



**Renato Alexandre
Rodrigues Monteiro**

**ANÁLISE DINÂMICA DA INTEGRAÇÃO DO SOLAR
TÉRMICO EM EDIFÍCIOS MULTI-FAMILIARES**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incansável apoio e sacrifício prestado, em prol duma educação mais alicerçada e credenciada.

o júri

presidente

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Prof. Auxiliar convidado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Prof. Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço a todos aqueles, que de uma maneira directa ou indirecta me ajudaram na execução deste trabalho.

Ao supervisor da tese, Prof. Doutor Nelson Martins, pelo voto de confiança, pela motivação transmitida, pelas indicações e sugestões que tornaram a execução do trabalho mais fluida.

Ao Engenheiro André Quintã, pelo tempo disponibilizado no esclarecimento de duvidas relacionadas com o *software* Simulink.

Aos meus colegas de curso, pela ajuda e companheirismo demonstrados ao longo da realização da tese.

palavras-chave

Sistema solar, colector, solar térmico, AQS, radiação, energia solar, transitória

resumo

O trabalho desenvolvido e apresentado neste documento, visa uma melhor compreensão dos sistemas solares térmicos. Sendo uma tecnologia conhecida no mercado e pela maioria da população, os sistemas solares vivem um período de expansão e constante optimização. Focando a atenção na utilização de colectores solares para aquecimento de águas sanitárias, o presente trabalho demonstra como pode ser simulado um sistema deste tipo, num *software* de análise transitória. São investigados os componentes inerentes ao sistema, os parâmetros de entrada, e como se relacionam entre si. Consequentemente, é analisada também a capacidade de optimização do sistema, estudando cada componente individualmente e registando a sua contribuição para o desempenho total mesmo.

keywords

Solar System, collector, solar thermal, AQS, radiation, solar energy, transient

abstract

The work developed and presented in this document, seeks a better understanding of solar thermal systems. As a technology known in the market and by the majority of the population, the solar systems live a period of constant expansion and optimization. Turning attention to the use of solar collectors for heating water, health, this work shows how it can be simulated such a system, in a transient *software* analysis. The components inherent to the system are investigated as the *input* parameters, and how they interact. Consequently, it will be also analyze, the ability to optimise the system, studying each component individually and noting its contribution to the total system performance.

SUMÁRIO 1

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO 3

1.1 CONTEXTO	3
1.2 MOTIVAÇÃO	4
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.3.1 <i>O solar térmico e os edifícios</i>	4
1.3.2 <i>Implementação de solar integrado em Hong Kong</i>	5
1.3.3 <i>O sistema colector solar</i>	7
1.3.4 <i>As análises:</i>	11
1.3.4.1 Tanques de armazenamento	11
1.3.4.1 Analise com o TRNSYS e ANN	12
1.3.4.3 Equivalent Thermal Network	14
1.3.4.4 Simulação de um sistema colector solar para aquecimento de águas doméstico usando um modelo transitório	15
1.3.4.5 Simulação de um sistema híbrido (térmico e fotovoltaico)	17
1.3.4.6 Sistema de termossifão de duas fases	20
1.3.4.7 Modelação de um sistema solar integrado	23
1.3.4.8 Análise transitória de um fluído circulante solar	24
1.3.5 <i>Os softwares:</i>	26
1.3.5.1 TRNSYS	26
1.3.5.2 Energy Plus	27
1.3.5.3 C++ e FORTRAN99	27
1.3.5.4 Math Cad	28
1.3.5.5 Simulink (Matlab)	28
1.4 PROBLEMAS REAIS, OPINIÕES REAIS:	31
1.4.1 <i>António Batista</i>	31
1.4.2 <i>Soluções/opiniões de fabricantes</i>	32
1.5 CONTRIBUIÇÃO DA TESE	32
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	33

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 35

2.1 INTRODUÇÃO	35
2.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO	35
2.3 DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS	35
2.3.1 <i>Radiação absorvida</i>	35
2.3.2 <i>Consumo</i>	41
2.3.3 <i>Colector Solar</i>	42
2.3.4 <i>Tanque</i>	43
2.3.5 <i>Problemas encontrados</i>	44
2.4 RESUMO DO CAPÍTULO 2	45

CAPÍTULO 3: MODELO NUMÉRICO E FERRAMENTA COMPUTACIONAL USADA	47
3.1 INTRODUÇÃO	47
3.2 DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA UTILIZADA: O SIMULINK	47
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DAS EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS	49
3.4 DESCRIÇÃO DETALHADA DO SISTEMA	49
3.4.1 <i>Controlo de caudal do primário</i>	51
3.4.2 <i>Serpentina</i>	51
3.4.3 <i>Controlo da temperatura do tanque</i>	52
3.4.4 <i>Consumo</i>	53
3.4.5 <i>Resistência auxiliar</i>	54
3.5 RESUMO DO CAPÍTULO 3	57

CAPÍTULO 4: ANÁLISE TRANSITÓRIA DO SISTEMA USANDO O SIMULINK: INFLUÊNCIA DOS VÁRIOS PARÂMETROS	59
4.1 INTRODUÇÃO	59
4.2 OPTIMIZAÇÃO DO SISTEMA, EFEITO DE CADA COMPONENTE INDIVIDUAL	59
4.2.1 <i>Colector solar</i>	59
4.2.1.1 <i>Série vs Paralelo</i>	60
4.2.1.2 <i>Treze Colectores em série</i>	61
4.2.1.3 <i>Perda de eficiência</i>	62
4.2.1.4 <i>Treze colectores em série vs 13 colectores em paralelo</i>	63
4.2.1.5 <i>Várias Configurações</i>	64
4.2.2 <i>Tanques de Armazenamento</i>	66
4.2.2.1 <i>Dois Tanques em série contra corrente, em série normal, e em paralelo</i>	66
4.2.2.2 <i>Influência dos volumes e número de tanques</i>	67
4.2.2.3 <i>Caudal do circuito primário</i>	72
4.3 RESUMO DO CAPITULO 4	73

CAPÍTULO 5: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE AS FERRAMENTAS RETSCREEN, SOLTERM E TRANSOL

5.1 INTRODUÇÃO	75
5.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DO TIPO ESTACIONÁRIO	75
5.2.1 <i>O módulo do Retscreen®</i>	75
5.2.2 <i>O módulo Solterm®</i>	76
5.3 CASO DE ESTUDO	77
5.3.1 <i>Definição das principais variáveis</i>	77
5.4 ANÁLISE DO CASO DE ESTUDO USANDO OS SOFTWARES	79
5.4.1 <i>Análise do caso de estudo usando o modulo do Retscreen®</i>	79
5.4.2 <i>Análise do caso de estudo usando o modulo do Retscreen® com dados climáticos do Solterm®</i>	80
5.4.3 <i>Análise do caso de estudo usando o modulo do Solterm® com consumo semelhante ao Retscreen®</i>	82
5.4.4 <i>Análise do caso de estudo usando o Solterm® com consumo fraccionado</i>	82
5.4.5 <i>Análise do caso de estudo usando o modelo transitório desenvolvido.</i>	83
5.5 RESUMO DO CAPÍTULO 5	86

CAPITULO 6: POTENCIAL DE ANÁLISE PERMITIDO PELO MODELO TRANSITÓRIO

6.1 INTRODUÇÃO	89
6.2 O EFEITO DO VOLUME E NÚMERO DE RESERVATÓRIOS DE ARMAZENAMENTO	89
6.3 CAUDAL DO CIRCUITO PRIMÁRIO	91
6.4 POTÊNCIA DA RESISTÊNCIA AUXILIAR	91
6.5 INCLINAÇÃO DO COLECTOR	92
6.6 TESTE PARA 16 PESSOAS	93
6.7 APLICAÇÃO DE COLECTORES MAIS EFICAZES	94
6.8 RESUMO DO CAPÍTULO 6	95

CAPITULO 7: CONCLUSÕES

7.1 NOTAS FINAIS	97
7.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	97
7.3 TRABALHO FUTURO	98

REFERÊNCIAS

ANEXO – MANUAL DE UTILIZAÇÃO

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	ESQUEMA PROPOSTO NA ANÁLISE DE UM SISTEMA CENTRALIZADO DE CIRCULAÇÃO FORÇADA NA FACHADA DE UM EDIFÍCIO	5
FIGURA 2	GANHOS TÉRMICOS NAS DUAS FACHADAS E O TOTAL AO LONGO DO ANO (JANEIRO DEZEMBRO)	6
FIGURA 3	TEMPERATURA DE ARMAZENAMENTO MEDIA AO LONGO DO ANO	7
FIGURA 4	ESQUEMA SOLAR AQ+AQS+ENERGIA DE APOIO	8
FIGURA 5	SISTEMA TOTALMENTE CENTRALIZADO	8
FIGURA 6	SISTEMA CENTRALIZADO COM APOIOS INDIVIDUAIS	9
FIGURA 7	SISTEMA INDIVIDUALIZADO, COM COLECTORES COMUNS	9
FIGURA 8	SISTEMA TOTALMENTE INDIVIDUALIZADO	10
FIGURA 9	ESQUEMA DE UM SISTEMA INDIVIDUALIZADO	11
FIGURA 12	ESQUEMA DE FLUXO (SISTEMA HÍBRIDO) USADO NO TRNSYS	13
FIGURA 13	NEURAL NETWORK	13
FIGURA 14	ESQUEMA DE UM CIRCUITO SOLAR	14
FIGURA 15	COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA COM 3m^2 DE COLECTORES, 100L DE ARMAZENAMENTO, 80C° DE CONSUMO E VARIAÇÃO DE CONSUMO NUM DIA NORMAL DE VERÃO.	16
FIGURA 16	FRACÇÃO SOLAR COMO FUNÇÃO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO E TEMPERATURA DE CONSUMO	16
FIGURA 17	ESQUEMA DE UM SISTEMA INTEGRADO SOLAR TÉRMICO	17
FIGURA 18	ESQUEMA DE CAMADAS DO MÓDULO SOLAR INTEGRADO NA PAREDE	18
FIGURA 19	TEMPERATURA A VÁRIOS NÍVEIS NO TANQUE (SISTEMA TERMOSSIFÃO E CIRCULAÇÃO FORÇADA)	19
FIGURA 20	ESQUEMA DO SISTEMA TERMOSSIFÃO DE DUAS FASES	20
FIGURA 21	<i>ESQUEMA BALANÇO ENERGÉTICO NO CONDENSADOR</i>	21
FIGURA 22	ESQUEMA BALANÇO ENERGÉTICO NO COLECTOR SOLAR	21
FIGURA 23	LIQUIDO SOLAR NOS COLECTORES	23
FIGURA 24	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS, DO COLECTOR	24
FIGURA 25	VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM A VARIAÇÃO DE FLUXO SOLAR (ANALISE ESTACIONARIA)	25
FIGURA 26	VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM A VARIAÇÃO DO FLUXO SOLAR (ANÁLISE DINÂMICA)	25
FIGURA 27	TEMPERATURAS NA PAREDE DO TUBO E NO FLUÍDO EM VÁRIOS TEMPOS	25
FIGURA 28	PROJECTO NO TRNSYS	26
FIGURA 29	ESQUEMA DO SIMULINK TRADUZINDO AS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS	29
FIGURA 30	ESQUEMA DO PROJECTO EM SIMULINK	29
FIGURA 31	ESQUEMA DE BLOCOS DO TERMÓSTATO	30

FIGURA 32	AQUECEDOR DE AR	30
FIGURA 33	RESULTADO DA SIMULAÇÃO	31
FIGURA 34	COMPONENTES DA RADIAÇÃO GLOBAL	36
FIGURA 35	MOVIMENTO APARENTE DO SOL NOS DIFERENTES SOLSTÍCIOS DO ANO	37
FIGURA 36	DECLINAÇÃO SOLAR	38
FIGURA 37	REPRESENTAÇÃO DO AZIMUTE E ALTURA SOLAR	38
FIGURA 38	ESQUEMA ENERGÉTICO DO COLECTOR SOLAR	42
FIGURA 39	ESQUEMA DO ESQUEMA ENERGÉTICO DO TANQUE RESERVATÓRIO	43
FIGURA 40	EXEMPLO DE UM SISTEMA DE BLOCOS NO SIMULINK	48
FIGURA 41	ESQUEMA DE BLOCOS QUE TRADUZ A EXPRESSÃO ANALÍTICA DO TANQUE	50
FIGURA 42	ESQUEMA DE BLOCOS QUE TRADUZ A EXPRESSÃO ANALÍTICA DO TANQUE	50
FIGURA 43	ESQUEMA EM SIMULINK DO CONTROLO DO CAUDAL DO CIRCUITO PRIMÁRIO	51
FIGURA 44	ESQUEMA NO SIMULINK DA SERPENTINA	51
FIGURA 45	ESQUEMA DE LIGAÇÕES ENTRE DOIS RESERVATÓRIOS	52
FIGURA 46	DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLO DA TEMPERATURA DO TANQUE	52
FIGURA 47	COMPORTAMENTO (ON-OFF SEM CONTROLO) DA RESISTÊNCIA AUXILIAR	55
FIGURA 48	SOLUÇÃO PARA EVITAR A ELEVADA FREQUÊNCIA DE PULSOS DA RESISTÊNCIA AUXILIAR	55
FIGURA 49	ALGORITMO USADO NO CÁLCULO DE KWh GASTOS NA RESISTÊNCIA AUXILIAR	56
FIGURA 50	OBSERVAÇÃO DE KWh E kW	56
FIGURA 51	COLECTORES LIGADOS EM SÉRIE	59
FIGURA 52	COLECTORES LIGADOS EM PARALELO	60
FIGURA 53	ESQUEMA DE LIGAÇÃO SÉRIE CONTRA CORRENTE	66
FIGURA 54	ASPECTO GRÁFICO DO RETSCREEN®	76
FIGURA 55	ASPECTO GRÁFICO DO SOLTERM®	77
FIGURA 56	RESULTADOS DO RETSCREEN®	80
FIGURA 57	RESULTADO FINAL NO RETSCREEN® USANDO DADOS CLIMÁTICOS DO SOLTERM	81
FIGURA 58	RESULTADO FINAL DO SOLTERM®	82
FIGURA 59	RESULTADOS DO SOLTERM	83
FIGURA 60	RESULTADOS GRÁFICOS DO TRANSOL (TEMPERATURA DO TANQUE, CONSUMO, RADIAÇÃO, RESISTÊNCIA)	84
FIGURA 61	GRÁFICO DO SIMULINK PARA UM TESTE COM 16 USUÁRIOS	94

LISTA DE TABELAS:

TABELA 1	EFICIÊNCIAS DOS DOIS SISTEMAS	20
TABELA 2	VARIAS COMBINAÇÕES DE VOLUMES (2 TANQUES) E RESPECTIVOS GASTOS NA RESISTÊNCIA AUXILIAR	70
TABELA 3	VARIAS COMBINAÇÕES DE VOLUMES (4 TANQUES) E RESPECTIVOS GASTOS NA RESISTÊNCIA AUXILIAR	71
TABELA 4	VALORES DE CONSUMO DE ENERGIA AUXILIAR NAS VÁRIAS ANÁLISES	87
TABELA 5	COMBINAÇÕES DE VOLUMES DE 4 TANQUES PARA 4.12M^2 (2) DE COLECTORES	90
TABELA 6	VARIAÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA COM O AUMENTO DO CAUDAL DO CIRCUITO PRIMÁRIO	91
TABELA 7	VARIAÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA COM O AUMENTO DA POTÊNCIA NOMINAL DA RESISTÊNCIA	91
TABELA 8	VARIAÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA COM O AUMENTO DA INCLINAÇÃO DO COLECTOR	92
TABELA 9	VALORES FIXOS DE ENTRADA DO SISTEMA	96

LISTA DE GRÁFICOS:

GRÁFICO 1:	TEMPERATURAS DE SATURAÇÃO NO CONDENSADOR E COLECTOR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA NO TANQUE (SEM CONSUMO)	21
GRÁFICO 2:	RADIAÇÃO SOLAR AO LONGO DO PERÍODO	21
GRÁFICO 3:	EFICIÊNCIA DO COLECTOR E CONDENSADOR AO LONGO DO PERÍODO COM CONSUMO)	21
GRÁFICO 4:	EFICIÊNCIA DO COLECTOR E CONDENSADOR AO LONGO DO PERÍODO (SEM CONSUMO)	21
GRÁFICO 5	CAUDAL OBSERVADO AO LONGO DO DIA	23
GRÁFICO 6	TEMPERATURA ATINGIDA NO TANQUE NOS DOIS SISTEMAS AO LONGO DO PERÍODO (COM CONSUMO)	23
GRÁFICO 7	RADIAÇÃO HORIZONTAL	40
GRÁFICO 8	RADIAÇÃO ABSORVIDA	40
GRÁFICO 9	RADIAÇÃO ABSORVIDA COM AZIMUTE 0°	41
GRÁFICO 10	RADIAÇÃO ABSORVIDA COM AZIMUTE 80°	41
GRÁFICO 11	EFEITO DO CONTROLO DA TEMPERATURA DO TANQUE	53
GRÁFICO 12	PICO DE CONSUMO	54
GRÁFICO 13	EFEITO DO CONTROLO DE CAUDAL DE CONSUMO	54
GRÁFICO 14	TEMPERATURAS ATINGIDAS COM 3 COLECTORES LIGADOS EM SÉRIE E 3 EM PARALELO (CONSUMO CONSTANTE E COM PARÂMETROS FIXOS)	61
GRÁFICO 15	TEMPERATURAS ATINGIDAS PELOS DIFERENTES 13 COLECTORES QUANDO LIGADOS EM SÉRIE	62
GRÁFICO 16	EFICIÊNCIA DOS COLECTORES EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COLECTORES	63
GRÁFICO 17	TEMPERATURAS ATINGIDAS POR 13 COLECTORES EM SÉRIE E EM PARALELO	63
GRÁFICO 18	TEMPERATURAS ATINGIDAS POR DIFERENTES LIGAÇÕES DOS COLECTORES COM CAUDAL DO PRIMÁRIO ELEVADO (0.08 KG/S)	64
GRÁFICO 19	TEMPERATURAS ATINGIDAS POR DIFERENTES LIGAÇÕES DOS COLECTORES, COM CAUDAL DO PRIMÁRIO BAIXO (0.02 KG/S)	65
GRÁFICO 20	TEMPERATURAS ATINGIDAS NOS TANQUES COM MESMO VOLUME TOTAL MAS DIFERENTES LIGAÇÕES	67
GRÁFICO 21	TEMPERATURAS ATINGIDAS COM TANQUES DE 100L CADA, LIGADOS EM SÉRIE CONTRA CORRENTE	68

GRÁFICO 22	TEMPERATURAS ATINGIDAS COM TANQUES 50L E APOIO E 150L NO TANQUE DE CONSUMO, LIGADOS EM SÉRIE CONTRA CORRENTE	69
GRÁFICO 23	TEMPERATURAS ATINGIDAS COM TANQUES 150L DE APOIO E 50L NO TANQUE DE CONSUMO, LIGADOS EM SÉRIE CONTRA CORRENTE	69
GRÁFICO 24	VARIAÇÃO DOS KWh GASTOS, COM O CAUDAL DO CIRCUITO PRIMÁRIO.	72
GRÁFICO 25	VARIAÇÃO DOS KWh GASTOS COM O CAUDAL DO CIRCUITO PRIMÁRIO (VALORES INTERPOLADOS)	72
GRÁFICO 26	EVOLUÇÃO DA RADIAÇÃO ABSORVIDA NUM ANO	84
GRÁFICO 27	EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DO TANQUE AO LONGO DE UM ANO	85
GRÁFICO 28	EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA E COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA DO TANQUE EM 6 DIAS	85
GRÁFICO 29	EVOLUÇÃO DA RADIAÇÃO EM 6 DIAS	86
GRÁFICO 31	RADIAÇÃO ABSORVIDA HORIZONTAL E COM COLECTOR INCLINADO 50°	93

SUMÁRIO

A temática da energia é uma constante no nosso dia-a-dia. Pode ser discutida sobre diversos aspectos, sendo um deles bastante actual e evolutivo, a área das energia renováveis. Todas as forças da natureza e fontes energéticas são passíveis de serem aproveitadas pelo homem, transformando essa energia potencial em energia útil. Pela sua grandiosidade e presença, o sol representa um papel fundamental no fornecimento de energia terrestre. Os colectores solares são o instrumento primário na absorção desta energia. Dependendo da sua construção e sistema em que é integrado, pode disponibilizar a energia em forma de electricidade ou em forma de calor. Os sistema solares térmicos usam a ultima, para aquecer um determinado fluido que pode ser usado directamente ou mediante um permutador de calor. Os conhecidos colectores solares para aquecimento de águas sanitárias (AQS), são uma tecnologia conhecida e razoavelmente difundida no mercado particular. Este trabalho pretende estudar o comportamento deste tipo de sistema, analisando primeiramente, os componentes individuais (tanques, colectores, permutadores, resistências auxiliares, controlos) e posteriormente a sua contribuição energética no sistema. Estes componentes são essenciais num sistema colector solar térmico e portanto não podem ser considerados e estudados apenas individualmente e portanto usa-se como objecto de optimização o valor de kWh dispendido no aquecimento das águas quando a energia solar não é suficiente. Obviamente, pretenda-se que o valor de energia auxiliar seja o mais baixa possível. Usa-se o Simulink como ferramenta numérica de simulação, que trabalha num enquadramento dinâmico tendo em linha de conta o tempo e variações de caudais, temperaturas, entre outros, o que torna a análise ainda mais real. Serão ainda efectuados testes em *softwares* já existentes, como o Retscreen® e Solterm®, que trabalham numa base estacionária, e tentar perceber de que forma os resultados são influenciados pela inclusão do *input* tempo.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A actualidade é fortemente dependente da energia. As políticas e decisões que regem os países, são muitas vezes baseadas nesta temática. É recorrente testemunharmos campanhas que apelam ao consumo racional e comportamentos “verdes”. De facto, as reservas conhecidas colocam-nos num cenário preocupante, propulsor de novas acções e de uma remodelação do nosso estilo de vida. Com este objectivo, nasceram leis, como o RCCTE que, de uma maneira obrigatória, incute esta necessidade de racionalização. A 4 de Abril de 2006 são publicados decreto lei nº78/2006, DL nº79/2006 e DL nº80/2006. O primeiro aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, o segundo aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos e Climatização em Edifícios (RSECE) e por fim o DL nº80/2006 aprova o Regulamento das características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este último será o que mais impacto causará devido à maior população que abrange; o sector dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo total de energia da União Europeia, sendo que cerca de 70% é consumido nos edifícios residenciais [1]. Este novo decreto lei vem impor limites de consumo de energia para climatização e aquecimento de águas sanitárias. Esses menores limites podem ser conseguidos através de tecnologias que aproveitam as energias renováveis, como o sol, para as converter em energia útil. Os colectores solares são um bom exemplo desta tecnologia e é um mercado que vive uma etapa de grande expansão. No entanto, embora existam muitos fabricantes e ainda mais vendedores, a tecnologia é explorada ainda de uma maneira muito empírica e carece de estudos que promovam a sua maior eficácia. O trabalho apresentado, procura responder a certas questões, muitas vezes ignoradas pelos instaladores, que são cruciais na valorização de uma instalação. Para isso, o estudo limitar-se-á ao uso de um sistema colector solar para aquecimento de águas sanitárias; a justificação desta escolha rege-se por motivos económicos, já que o uso do solar térmico para aquecimento central não se pode considerar uma tecnologia habitual e além disso o investimento inicial seria bastante maior. Dado que este trabalho procura solucionar problemas reais, é importante limitar o problema a situações que estão implementadas no mercado e que a maioria das pessoas conhece. Importa também referir que o sistema é de circulação forçada. Embora o sistema de termossifão seja também comum, é um sistema menos eficaz e que não tem tantas potencialidades de optimização já que praticamente se auto-sustém.

1.2 Motivação

Sendo a energia, e principalmente as energias renováveis, uma área de pessoal interesse e que merece a atenção de todos, a escolha de um trabalho que tivesse por base este ramo da engenharia era implícita. Assim como a curiosidade, também a tecnologia desta área vive um período de grande crescimento e expansão. Como em qualquer outra área ou produto, nunca se pode dizer que tudo está feito, e foi com esta procura de perguntas por responder que se delineou este trabalho. Os sistemas estão no mercado, estão implementados e são conhecidos por todos; existem *softwares* usados nos gabinetes de projecto que ajudam a dimensionar e perceber como funciona o sistema. Não existia no entanto, uma ferramenta capaz de levar em linha de conta todos os componentes que fazem parte de um sistema colector solar térmico e a maneira como eles se comportam no tempo (inércias, velocidades de resposta, sazonalidade, etc). Surge espontaneamente a referência do Simulink e a sua capacidade de trabalhar com sistemas dinâmicos. Apresentavam-se portanto dois desafios: saber se era praticável usar o Simulink para atingir os objectivos a que nos propúnhamos e, no caso de ser possível, usar então essa boa ferramenta para chegar a resultados. Dois desafios interessantes, tanto ao nível do gosto pessoal pela área em que se inserem, como da utilidade futura que poderá vir a ter.

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 O solar térmico e os edifícios

Diminuir os consumos de energia não implica necessariamente uma diminuição da qualidade de vida ou uma significativa mudança de hábitos. A tecnologia, seja ela traduzida em máquinas e componentes ou numa abordagem arquitectónica inovadora energeticamente [26], aliada a uma consciência ambiental mais refinada, são suficientes para atingir esse objectivo. No que toca ao sector residencial, a tecnologia mais óbvia é a dos colectores solares para aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS). Sendo que o RCCTE permite o uso de outras formas renováveis de energia, que captem, numa base anual, energia equivalente á dos colectores solares, podendo esta ser utilizada para outros fins que não a do aquecimento de águas se tal for mais eficiente ou conveniente [2]. Infere-se que o mercado encontra aqui uma via de expansão, tanto ao nível económico como ao nível da optimização da tecnologia.

Paralelamente ao uso e aplicação de sistemas solares (baseada num projecto independente da arquitectónica do edifício), existe também uma integração destes sistemas, orgânica ao próprio edifício e seu planeamento arquitectónico. Conhecido como building-integrated ou numa abreviatura, BIST (building integrated solar thermal) [3], esta

ideologia considera o sistema solar como parte integrante do edifício. Para a sua implementação ser aprovada, tem de ser termicamente eficaz, não pode degradar a estética do edifício e não poderá ser demasiadamente dispendiosa. Se algum destes parâmetros falhar, será difícil a sua aceitação junto do consumidor. Se, por outro lado estes aspectos forem tidos em conta, então esta forma de aproveitar os recursos naturais, é bastante aliciante visto que como parte integrante do edifício que é, salvaguarda as necessidades energéticas dos ocupantes de uma forma directa e optimiza a construção.

1.3.2 Implementação de solar integrado em Hong Kong

Um estudo levado a cabo por T.T. Chow , K.F. Fong, A.L.S. Chan, Z. Lin em Hong Kong, relata o interesse e viabilidade que existe na implementação destes sistemas integrados. Os colectores solares lembram a imagem recorrente de um telhado com umas caixas negras inclinadas para o sol, e continua a ser esse o aspecto associado a estes colectores. No entanto, quando se fala de grandes edifícios, e ainda para mais com esta nova lei RCCTE, a implementação de colectores nos telhados torna-se mais difícil pois os prédios são altos e a área disponível no telhado pode não satisfazer as necessidades exigidas. A solução a adoptar será a instalação dos colectores nas fachadas verticais. Nesta configuração encontra-se uma outra vantagem ao nível do aquecimento pois os colectores podem funcionar como elementos isoladores poupando-se assim na conta do ar condicionado, por exemplo. Optou-se por estudar a viabilidade de um sistema centralizado, como se vê na Figura 1, com circulação forçada.

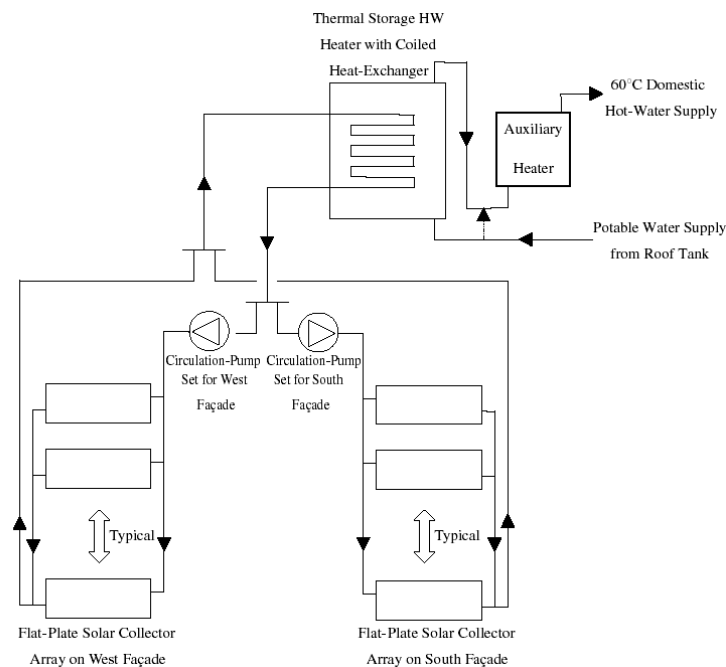


Figura 1 Esquema proposto na análise de um sistema centralizado de circulação forçada na fachada de um edifício

É tomada em consideração a orientação dos colectores uma vez que a radiação incidente é diferente ao longo do ano. Foi usado o TRNSYS neste estudo e tal como grande parte destas análises, o método escolhido para abordar o problema é dividir o sistema nos seus componentes e analisá-los separadamente, nomeadamente o colector solar plano e o sistema de armazenamento. Foram considerados vários valores para se poderem resolver as equações matemáticas inerentes a cada componente: considera-se um prédio de 28 andares com 8 apartamentos por andar, podem ser aplicados 840m² de colectores, que dá 3.75 m² por apartamento. Os mesmos são dispostos nas fachadas a sul e oeste pois o seu comportamento é diferente ao longo das estações; no Inverno a fachada sul recebe mais sol e vice-versa. Na Figura 2 podemos constatar o mesmo:

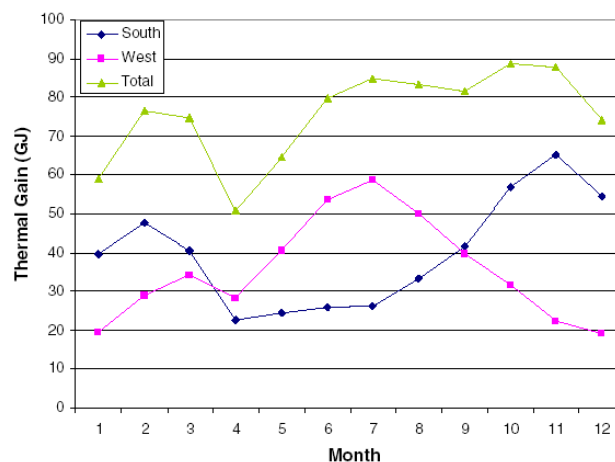


Figura 2 Ganhos térmicos nas duas fachadas e o total ao longo do ano (Janeiro-Dezembro)

A eficiência dos colectores é de 0.78, a emissividade e absorvidade dos colectores são de 0.03 e 0.947 respectivamente. O depósito tem 36m³ o que corresponde a um consumo diário de 160l por apartamento (224 apartamentos totais).

Capacidade de resposta dos colectores: veio-se a verificar que os colectores conseguem cumprir as exigências (excepto em alguns períodos da Primavera). Fornecem (as fachadas a Sul e Oeste) 904GJ por ano. Sendo 840m² de colectores a capacidade é de 1.08GJ/m²/ano. A radiação solar medida na fachada sul foi de 1216GJ e na fachada oeste de 1141GJ, resultando assim numa eficiência dos módulos solares de 38.4%.

No que respeita ao armazenamento verificou-se que a temperatura média de saída foi 41.4°C. Nota-se, na Figura 3, uma oscilância que é expectável mas que denota a necessidade de um aquecimento auxiliar nas temperaturas mais baixas. De facto, foram consumidos 1000GJ eléctricos neste sistema auxiliar mais o sistema de bombas. No entanto sem esta instalação, o consumo anual previsto seria de 2146GJ, inferindo portanto uma poupança de 53,4%.

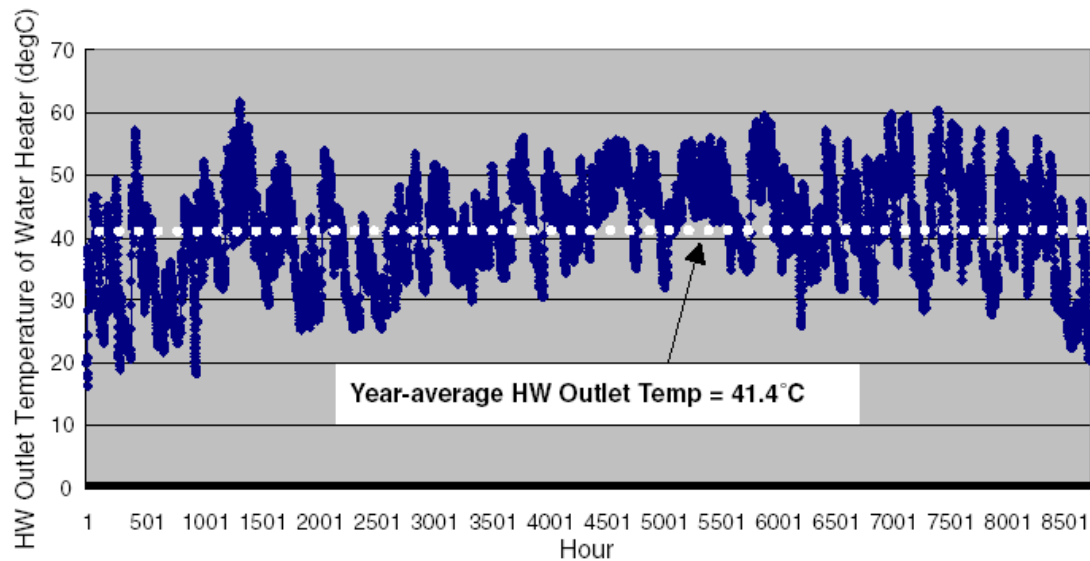


Figura 3 Temperatura de armazenamento media ao longo do ano

Estas poupanças traduzem-se numa amortização de investimento de 9.2 anos, que pode ser reduzido pelo facto já mencionado de poupança em ar condicionado. Este investimento encontra a sua grande barreira no elevado custo inicial, face ao sistema de aquecimento tradicional. Com os devidos incentivos estatais, esta barreira pode ser minimizada.

1.3.3 O sistema colector solar

O sistema colector solar é constituído (na forma mais simples) pelos colectores solares, tubagens, reservatório (comummente mais que um), bombas circuladoras e aquecimento auxiliar eléctrico.

Os colectores solares dividem-se em diferentes categorias dependendo da sua construção. Consideram-se então 2 principais sistemas:

- colectores planos, que podem ou não ter cobertura; sendo mais utilizados quando as temperaturas de utilização não são tão exigentes.
- colectores solares sobre vácuo. São colectores que atingem maiores temperaturas devido ao seu isolamento por vácuo.

Apresenta-se na Figura 4 um esquema da Energie [4] que integra o solar térmico para aquecimento de águas, aquecimento central e um sistema de apoio.

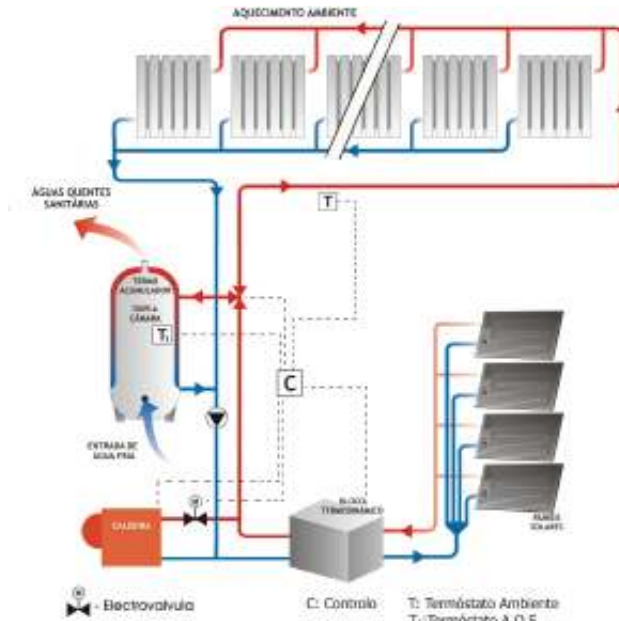


Figura 4 Esquema solar AQ+AQs+energia de apoio

Como se verifica, os colectores solares são apenas uma parte de todo o conjunto, o que demonstra a importância de analisar todo o sistema. No caso de edifícios multi-familiares, o conjunto é ainda mais complexo pois é acrescido de múltiplos reservatórios, bombas e sistemas auxiliares. No entanto, existem várias configurações no que toca à distribuição destes. De seguida são mostradas as configurações mais comuns [5]:

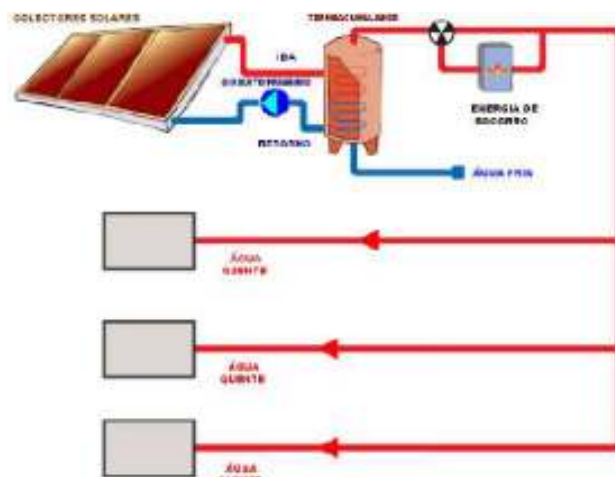


Figura 5 Sistema totalmente centralizado

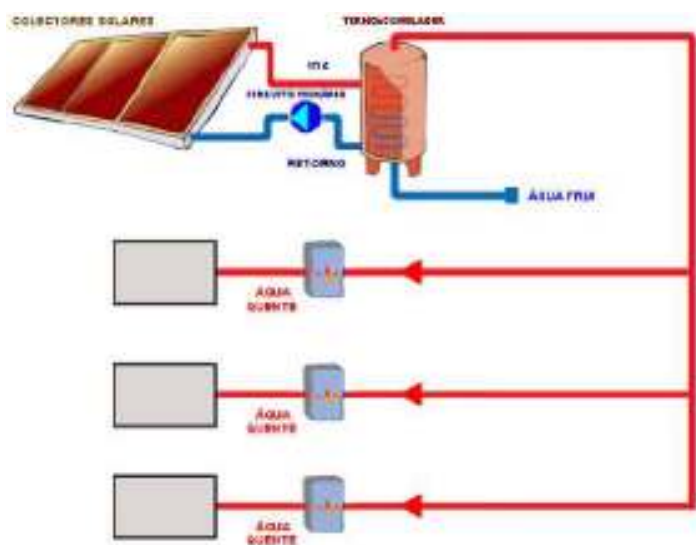


Figura 6 Sistema centralizado com apoios individuais

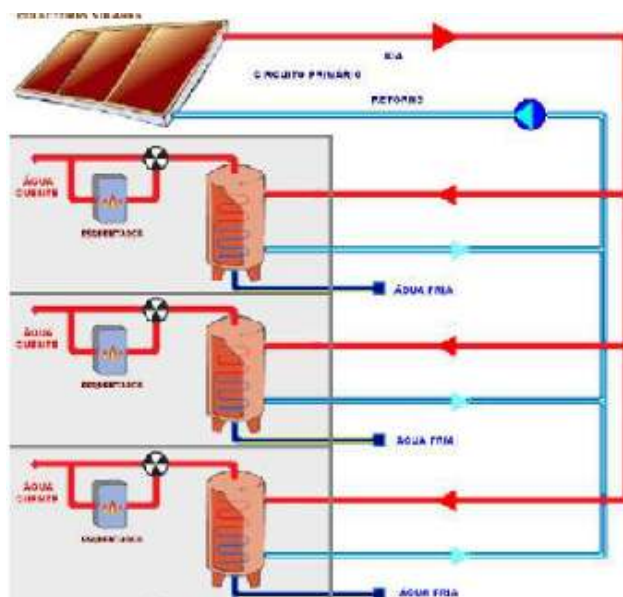


Figura 7 Sistema individualizado, com coletores comuns

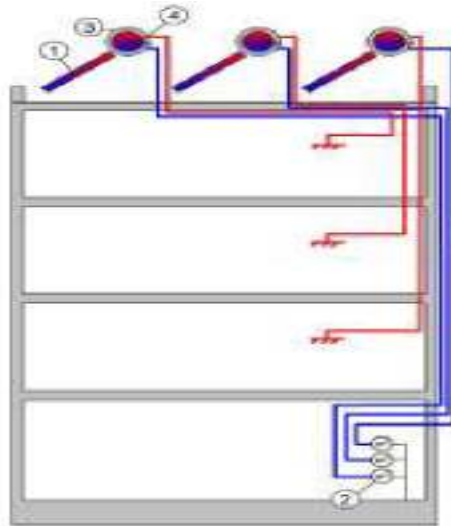


Figura 8 Sistema totalmente individualizado

Existem defensores dos vários tipos de tipologia. O sistema centralizado oferece a vantagem de ser o que menos tubagem tem e portanto, mais eficiente no que toca a perdas de carga térmica, além de que o isolamento é em menor escala e portanto, mais uma vez, as perdas também o são. É também um sistema mais barato dada a sua simplicidade. Caso seja necessário adicionar mais colectores, a operação é também mais fácil com este sistema. Traz a desvantagem de ocupar espaço no telhado, com componentes que não os colectores, e a gestão de caudais por apartamento é substancialmente mais complexa. [6]

A Vulcano [7] opta por outro lado por um sistema com reservatórios individuais. Defende que este sistema é mais “justo” para o habitante pois através de válvulas reguladoras de caudal consegue-se ter controlo sobre a correcta distribuição a fazer, dependendo do tipo de apartamento. É também mais fácil ao técnico de manutenção reparar uma avaria que apenas atinja um apartamento.

Será um esquema semelhante ao da Figura 9.

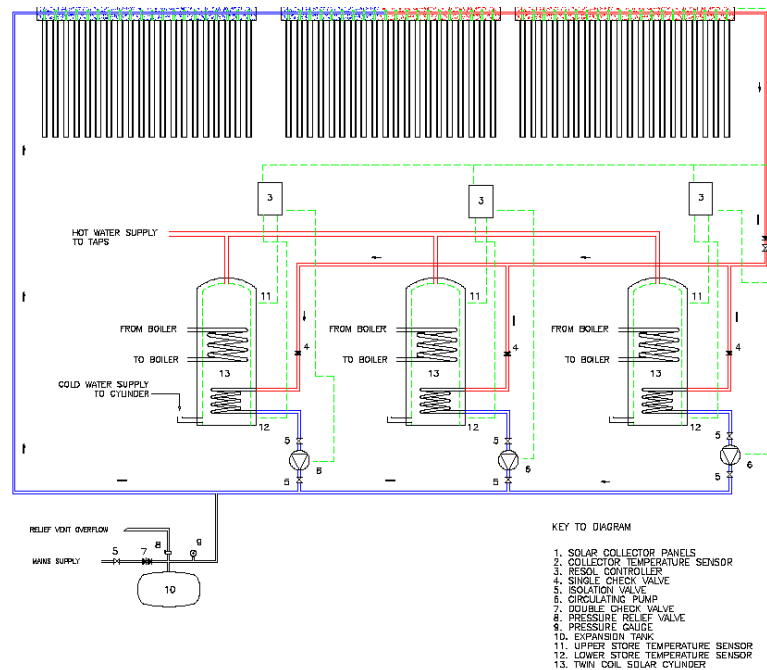


Figura 9 Esquema de um sistema individualizado

Construtivamente, a tecnologia solar térmica é idêntica nos vários fabricantes, a viabilidade de melhoramento do sistema assenta na escolha do conjunto a usar e em técnicas de optimização do sistema, e não propriamente nos componentes em si. Quando se fala em sistemas colectores solares, não podemos esquecer o restante equipamento inerente a esta tecnologia: reservatórios, bombas, tubagem, caldeiras, etc. Cada um tem as suas características e problemas associados.

1.3.4 As análises:

1.3.4.1 Tanques de armazenamento

Afif Hasan [24], no seu estudo, enquadra a sua pesquisa na eficiência dos tanques de armazenamento. Defende mesmo, que a eficiência de um sistema de AQS é mais dependente do sistema armazenador do que os colectores em si. O *software* usado na simulação foi o recorrente TRNSYS, e também recorrente foi a atribuição de parâmetros de funcionamento e características técnicas. A Figura 11 resume o objectivo do estudo, e podemos concluir que até certo valor, a eficiência aumenta com o volume do tanque utilizado. O aumento de volume do tanque promove a diminuição de temperatura nos colectores o que consequentemente também diminui as perdas de calor.

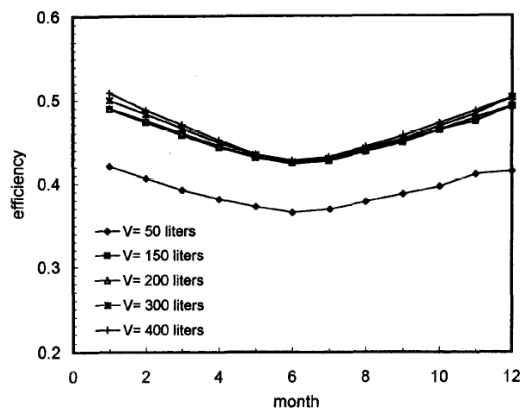


Figura 11 Eficiência do sistema em função do volume de armazenamento

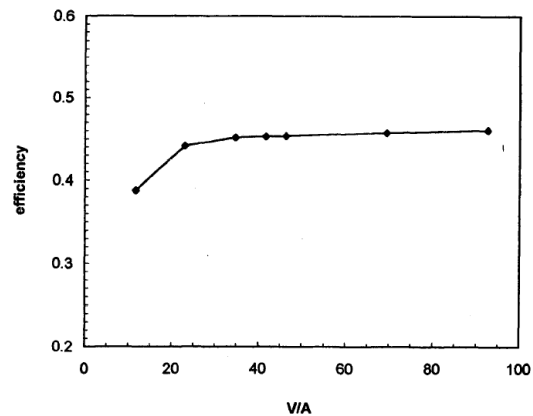


Figura 10 Eficiência anual em função da fracção volume/área do tanque

Servindo de apoio à Figura 11, podemos ver a Figura 10 que demonstra o mesmo, existe um limite máximo até ao qual quanto maior o volume maior a eficiência. As performances de tanques horizontais ou verticais são iguais. De salientar também que os sistemas mais pequenos, embora não consigam cumprir os requisitos, são os mais eficientes, provavelmente pelo facto de contemplarem menores temperaturas e portanto menores perdas.

Aquando a aquisição dum sistema solar, o parâmetro mais preponderante é o preço de aquisição. A análise inicial do investimento centra-se então num estudo económico da instalação. Este estudo pode ser feito através de *softwares* como o Retscreen® [8] ou o Solterm® [9]. Estes *softwares* permitem escolher as características, meteorológicas, técnicas e económicas do sistema. No entanto, são *softwares* que realizam uma análise estacionária e portanto não entram em linha de conta com perdas associadas à tipologia do sistema ou às possíveis optimizações dos componentes, quando trabalham em condições reais e consequentemente variáveis no tempo. É necessário então recorrer a *softwares* que efectuem uma análise dinâmica para podermos comparar o mais fielmente possível o resultado numérico com o real; *softwares* como o TRNSYS [10] ou o Simulink do Matlab [11].

1.3.4.1 Analise com o TRNSYS e ANN

O software TRNSYS, como já foi mencionado, é dos *softwares* mais populares quando se pretende realizar uma análise transitória. O programa necessita de alguns *inputs*, tais como, área do colector, eficiência de ganho e perda do mesmo, e volume de armazenamento do tanque. O TRNSYS possui vários módulos (caixas) que representam diferentes componentes, como se vê na Figura 12 [35]. O TYPE 49 já inclui os colectores, o inversor e bateria. É preciso, adicionalmente os outros componentes/*inputs*, que são ilustrados na figura, como por exemplo o tanque (TYPE 38).

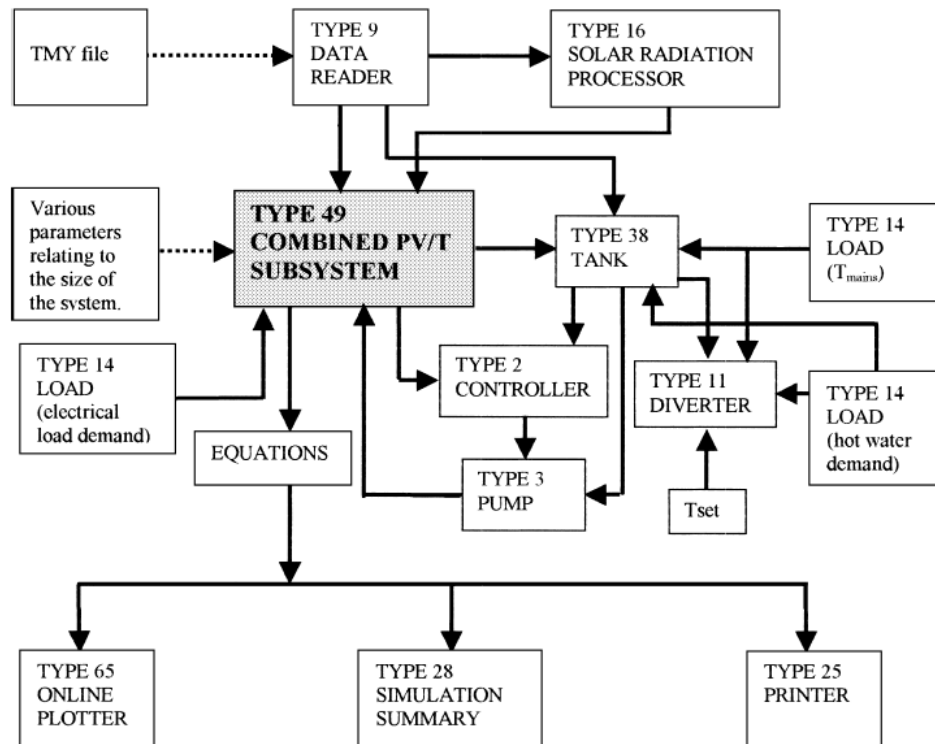


Figura 12 Esquema de fluxo (sistema híbrido) usado no TRNSYS

O diagrama de fluxo permite ao programa, identificar a inter-conectividade entre os componentes e a maneira como a informação flui entre eles. Após este passo e após estarem definidas as equações matemáticas características de cada componente, o programa é capaz de simular o funcionamento do sistema.

No estudo da previsão do comportamento de um sistema solar de circulação forçada [33], usou-se este software e o modelo ANN [34] para levar a cabo a análise. ANN significa artificial neural network. A Figura 13 representa esquematicamente a arquitectura deste modelo

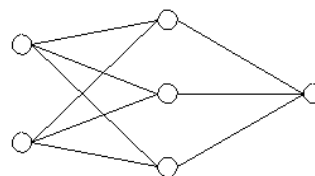


Figura 13 Neural network

É um modelo inovador que tenta prever o comportamento de um certo sistema. À semelhança do que ocorre no cérebro humano, este modelo implica a existência de neurónios, que recebem informação (*inputs*), e através de um código inerente ao neurónio (função transferência) é capaz de criar um *output*. A célula (neurónio) pode receber mais que um *input* traduzindo-os num só *output*. Ou seja, é possível existirem vários vectores de entrada, com diferentes pesos cada um, e conjugarem-se num vector de saída. Este percurso estrutural é dividido em camadas podendo essas camadas serem dependentes. É um modelo assente num forte conhecimento empírico e portanto não pode ser usado directamente num problema que não possua um banco de dados

experimental. Assume-se como um modelo de tentativa e erro. O erro que existe é minimizado através do método dos Mínimos desvios quadráticos.

A conclusão a que o estudo chegou, refere a duas ferramentas como sendo capazes de obter resultados que apenas diferem dos experimentais em 2,9%. Comparativamente, o TRNSYS é mais preciso nos seus resultados mas necessita de um elevado número de *inputs* e parâmetros para caracterizar os componentes, e necessita também de um tempo de processamento mais elevado. O ANN, é mais simples e consegue uma precisão bastante análoga ao TRNSYS, por outro lado, exige uma vasta disponibilidade de dados; o que representa uma desvantagem dada a escassez possível destes dados em certas condições.

1.3.4.3 Equivalent Thermal Network

Uma abordagem possível, levada a cabo por Dorota Wójcicka-Migasiuk e Andrzej Chochowski [18] baseia-se no Equivalent Thermal Network - ETN (Chochowski A., 1991). A análise é análoga a uma análise de um sistema eléctrico e as fórmulas matemáticas usadas, são criadas tendo em conta os diversos nós do circuito, sendo que cada nó é um componente do circuito. As resistências térmicas são quantificadas em [K/W]. Como se vê na Figura 14, as semelhanças a um circuito eléctrico são identificáveis.

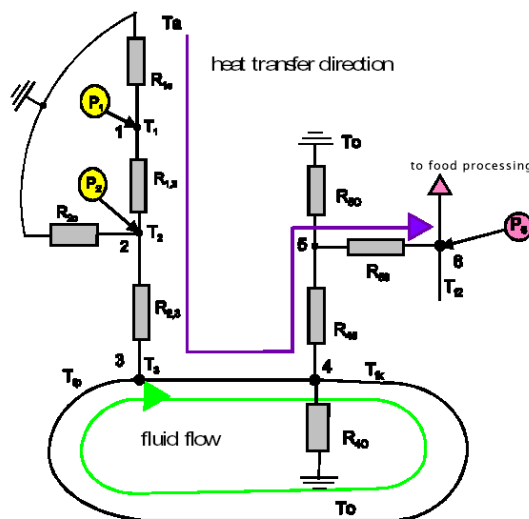


Figura 14 Esquema de um circuito solar

$$\text{Nó 1: } T_1 \cdot \left(\frac{1}{R_{ta}} + \frac{1}{R_{12}} \right) - \frac{T_2}{R_{ta}} = P_1 + \frac{Ta}{R_{12}}$$

$$\text{Nó 2: } -\frac{T_1}{R_{12}} + T_2 \cdot \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{21a}} + \frac{1}{R_{23}} \right) - \frac{T_3}{R_{23}} = P + \frac{Ta}{R_{2a}}$$

$$\text{Nó 3: } -\frac{T_1}{R_{ta}} + T_3 \cdot \left(\frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_{f1}} \right) + T_4 \cdot \left(\frac{1}{R_{45}} - \frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{4o}} \right) - \frac{T_5}{R_{45}} = \frac{T_0}{R_{4o}}$$

$$\text{Nó 4: } -\frac{T_1}{R_{23}} - T_3 \cdot \left(\frac{1}{R_{f1}} - \frac{1}{R_{23}} \right) + T_4 \cdot \left(\frac{1}{R_{45}} + \frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{4o}} \right) - \frac{T_5}{R_{45}} = \frac{T_o}{R_{4o}}$$

$$\text{Nó 5: } -\frac{T_1}{R_{45}} + T_5 \cdot \left(\frac{1}{R_{45}} + \frac{1}{R_{50}} + \frac{1}{R_{56}} \right) - \frac{T_6}{R_{56}} = \frac{T_0}{R_{50}}$$

$$\text{Nó 6: } -\frac{T_5}{R_{56}} + T_6 \cdot \left(\frac{1}{R_{56}} + \frac{1}{R_{f2}} \right) = P_6 + \frac{T_{f2p}}{R_{f2}}$$

Com as expressões matemáticas de cada nó constrói-se uma matriz que ao ser trabalhada deriva numa equação diferencial. A solução dessa equação é conseguida através do software MathCad 7.0. [15]

Consegue-se portanto, prever comportamentos nos vários nós (componentes) do sistema, permitindo assim uma análise mais cuidada aquando o projecto do mesmo.

1.3.4.4 Simulação de um sistema colector solar para aquecimento de águas doméstico usando um modelo transitório

Continuando o testemunho do trabalho já efectuado nesta área, atente-se no artigo de M. Bojic´ a, S. Kalogirou, K. Petronijevic, com o título de “Simulação de um sistema colector solar para aquecimento de águas doméstico usando um modelo transitório” [19]. O sistema é composto pelos colectores, armazenamento e um auxiliar eléctrico. O modelo matemático usado para simular as condições atmosféricas e sua variação ao longo do dia, foi programado em FORTRAN 99 [13]. Na Figura 15 podemos verificar os resultados obtidos.

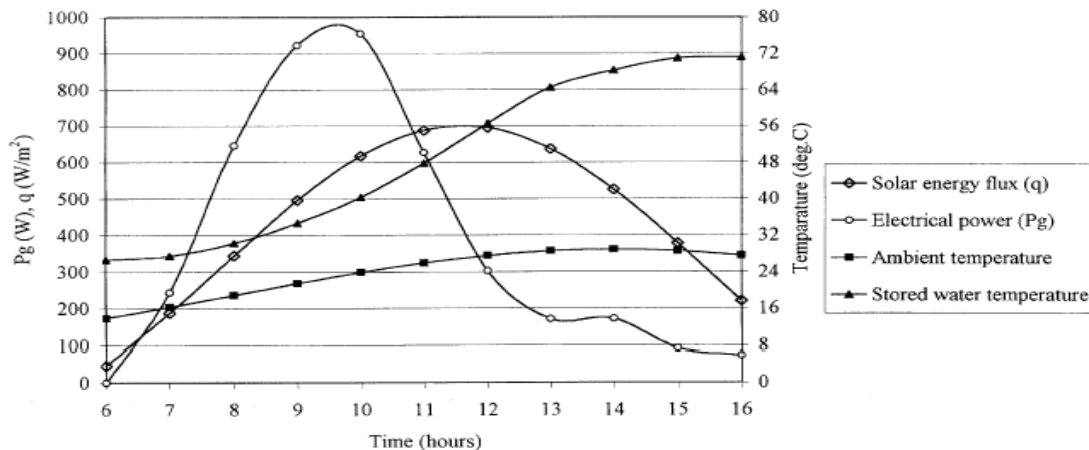


Figura 15 Comportamento de um sistema com 3m^2 de colectores, 100l de armazenamento, 80°C de consumo e variação de consumo num dia normal de Verão.

São assumidas as temperaturas de entrada de água no colector e o consumo de água armazenada. A temperatura de saída do colector, por sua vez é calculada através de equações matemáticas. Consideram-se valores de consumo diário, área de colectores, temperatura exigida, diferença de temperatura armazenada e de rede e consegue-se assim estabelecer uma relação óptima entre o volume do reservatório e a fracção solar (percentagem de contribuição de um sistema solar nas necessidades totais de uma habitação), como se pode ver na Figura 16.

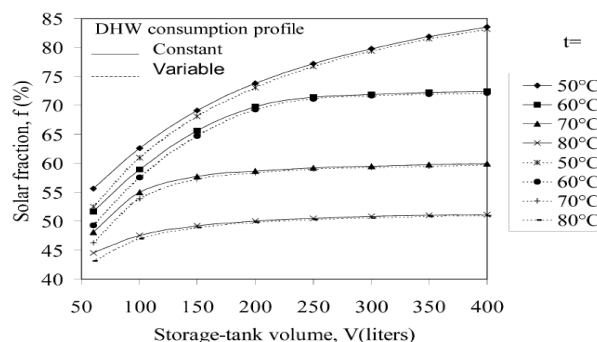


Figura 16 Fracção solar como função do volume do reservatório e temperatura de consumo

Concluiu-se que para temperaturas relativamente baixas (50°C - 60°C), quando se aumenta a capacidade do reservatório, também aumenta a fracção solar. Para altas temperaturas (70°C - 80°C), ao aumentar a capacidade do reservatório aumenta também a fracção solar, mas só até certo ponto (capacidades de 200L), a partir desse valor a variação é constante. Aliás, infere-se que para grandes volumes de armazenamento as variações de f (fracção solar) são menos dependentes dos parâmetros já descritos. No cômputo geral a fracção solar aumenta com a diminuição da temperatura de consumo e com o aumento da diferença de temperaturas da água de consumo.

É notória a variedade de sistemas de simulação passíveis de serem usados nesta área.

1.3.4.5 Simulação de um sistema híbrido (térmico e fotovoltaico)

T.T. Chow, W. He, A.L.S. Chan, K.F. Fong, Z. Lin, J. Ji [20] levaram a cabo uma simulação numérica de um sistema building-integrated, híbrido, térmico e fotovoltaico. Os autores afirmam que a literatura é rica em testemunhos de sistemas solares térmicos e sistemas fotovoltaicos; no entanto a área de sistemas híbridos está pouco explorada. Os colectores solares são parte integrante do edifício e encontram-se instalados nas paredes verticais deste, como demonstra a Figura 17.

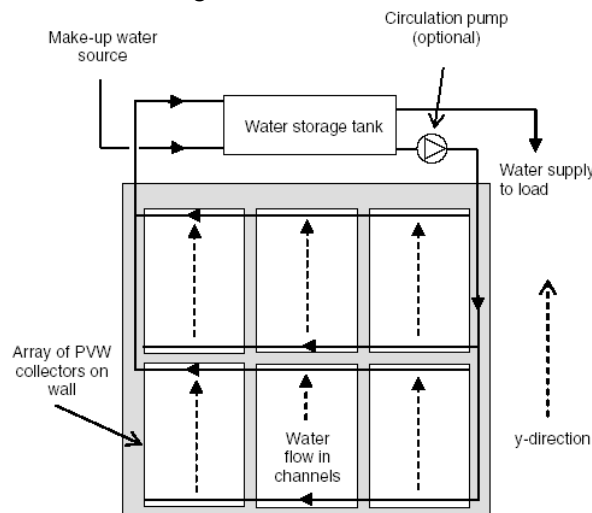


Figura 17 Esquema de um sistema integrado solar térmico

A primeira fila de colectores está ligada em paralelo com a segunda fila, para que possam receber água à mesma temperatura. O tanque ilustrado no topo é um modelo simples, com um auxiliar eléctrico e com diferentes cotas de entrada e saída. Este modelo divide o módulo solar em camadas, como se vê na Figura 18.

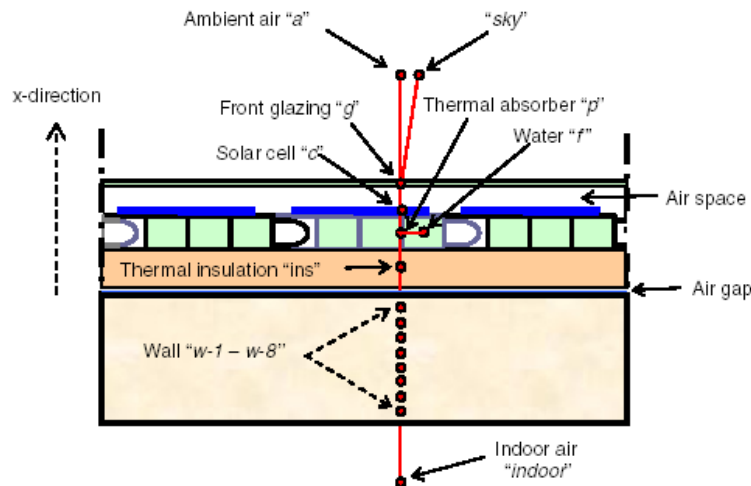


Figura 18 Esquema de camadas do módulo solar integrado na parede

Cada camada é caracterizada por equações matemáticas apropriadas. O tanque é também estudado e é dividido em 5 camadas de igual volume. Um aspecto importante reside nas entradas e saídas do tanque: a injeção de água proveniente da rede no tanque é efectuada na camada superior (1) e a saída para os colectores é feita na camada inferior 5; sempre que há um consumo, a saída efectua-se na camada 2 e a entrada é feita na camada inferior (5)

As comparações principais levadas a cabo neste estudo foram:

- A variação de temperatura da parede integrante dos colectores solares e da parede de referência (sem nada)
- A variação de temperatura ao longo da direcção vertical no tanque durante o dia e a noite
- A capacidade eléctrica dos PV durante o dia
- Eficiência diária do sistema

Em todos os casos a simulação numérica aproximou-se fielmente á experimentação real. De todos os resultados retenha-se o do tanque, traduzido na Figura 19 pois seria, á partida o mais problemático, visto ser o detentor de maior número de equações e variáveis. Como seria de esperar o sistema de termossifão atinge menores temperaturas do que o sistema de circulação forçada. Repare-se que a simulação numérica contempla 5 pontos e a medição experimental 3.

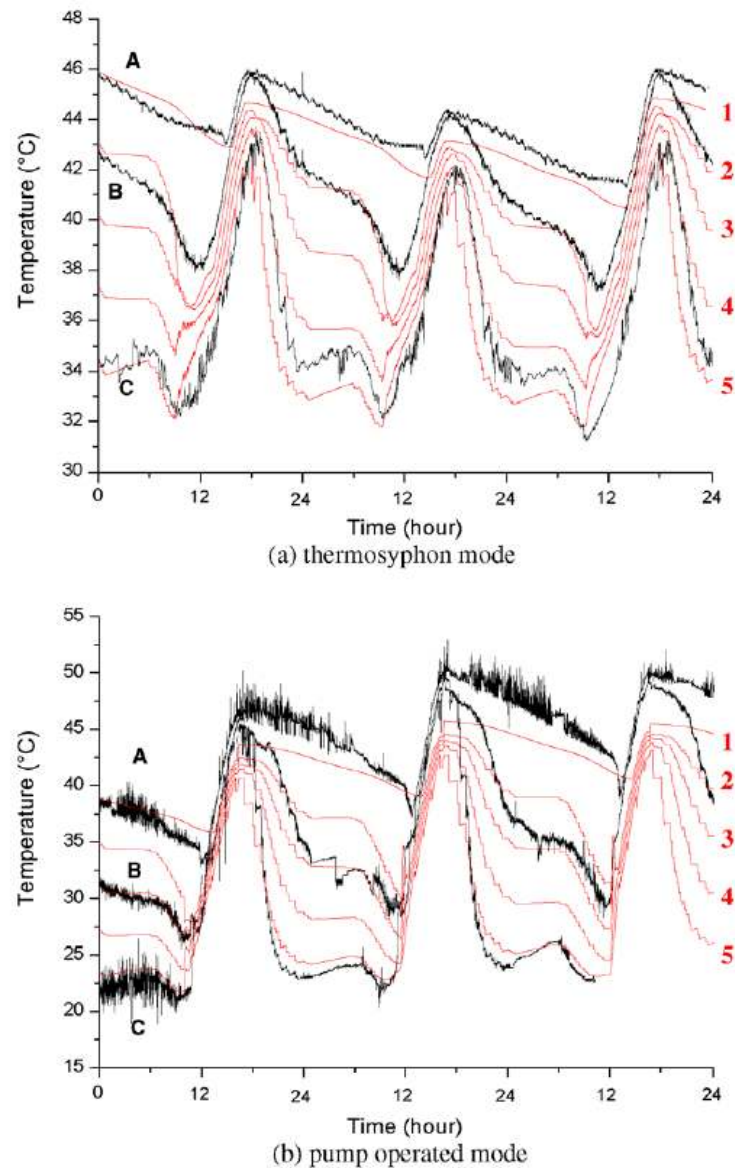


Figura 19 Temperatura a vários níveis no tanque (sistema termossifão e circulação forçada)

A análise fotovoltaica mostrou ser bastante mais simples. A incidência solar relaciona-se directamente com a electricidade produzida, que é uma função linear da temperatura. Tal como no caso do solar térmico, os resultados foram bastante próximos do real, estando sempre presente o problema do sombreamento, que não é fácil de prever com exactidão na análise numérica.

A Tabela 1 apresenta, em jeito de conclusão, os resultados de eficiência obtida

Performance comparison of PVW system daily efficiencies

Date	Thermal efficiency (%)		Electrical efficiency (%)	
	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation
<i>Thermosyphon test</i>				
17 July 2005	24.7	25.8	6.6	9.3
18 July 2005	26.8	26.9	6.7	9.4
19 July 2005	22.3	22.8	7.0	9.3
<i>Pump-operated test</i>				
1 December 2005	23.4	23.6	8.3	10.0
2 December 2005	25.4	24.5	8.5	9.7
3 December 2005	28.7	28.8	9.1	10.1

Tabela 1 Eficiências dos dois sistemas

Conclui-se portanto que a simulação traduz com precisão os resultados reais, principalmente no sistema térmico, afirmando-se assim, um bom instrumento na futura análise de outras instalações.

1.3.4.6 Sistema de termossifão de duas fases

Como mencionado na nota introdutória, os sistemas solares podem ser de circulação forçada ou de termossifão (circulação natural). A investigação que se apresenta a seguir analisa um sistema de termossifão. Existem diversos estudos na literatura sobre o ciclo de funcionamento de um sistema de uma fase, mas pouca literatura sobre os sistemas de duas fases. Estes sistemas usam (caso sejam fechados), como líquido circulante, um fluido com propriedades diferentes da água (por exemplo) e que possuem diferentes pontos de ebulição e liquefacção. É portanto um sistema de circulação natural. Khalid A. Joudi , Aouf A. Al-tabbakh [21], levaram a cabo este estudo. Simularam a performance de um sistema deste durante um dia típico, dividido em períodos de 15min. Os valores de incidência solar e temperatura foram aplicados no início de cada período. Os objectos de estudo foram: o caudal mássico, pressão e temperatura no colector e condensador, juntamente com a temperatura no tanque e eficiências do colector e condensador. Estes cálculos foram levados a cabo em três situações distintas:

- Consumo nulo, ou seja, não havia gasto de água do tanque
- Consumo contínuo
- Consumo intermitente

Veio-se a concluir que a pressão do sistema era dependente da carga imposta ao reservatório. Por outro

lado, a eficiência do colector não mostrou variação com a variação de carga, ao contrário do que se verifica com os sistemas de uma fase. No geral a eficiência do tanque e colectores é maior nos sistemas de duas fases,

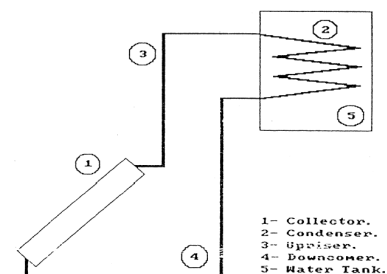


Figura 20 Esquema do sistema termossifão de duas fases

mostra também uma maior rapidez de resposta às solicitações e uma melhor capacidade de suportar as condições atmosféricas.

O presente estudo tenta analisar o comportamento de um sistema como o esquematizado na Figura 20. Usando o R-11 como fluido operante e ocupando inicialmente 60% do circuito.

Tal como estudos já apresentados, esta análise opta por estudar cada componente em separado, atribuindo portanto a cada um, diferentes modelos matemáticos térmicos e hidrodinâmicos. As características dos mesmos são arbitrados e a radiação solar é sugerida por Lunde [22].

O título exemplificativo, podemos ver nas Figura 21 e Figura 22 os balanços energéticos efectuados. É a partir deste balanços que se formulam as equações que darão origem ao modelo de simulação.

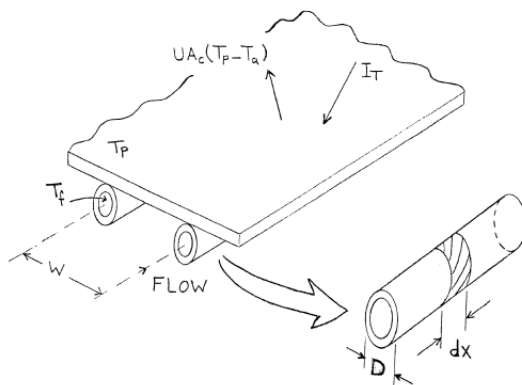


Figura 22 Esquema balanço energético no coletor solar

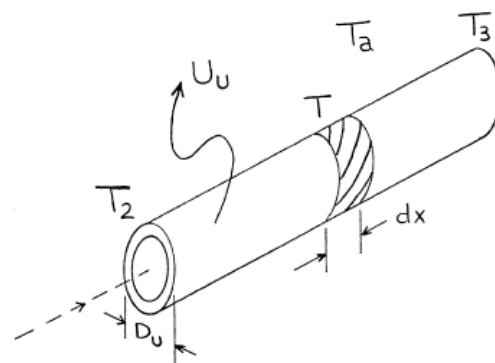


Figura 21 Esquema balanço energético no condensador

Nos sistemas de duas fases existem duas abordagens possíveis ao analisar o comportamento hidrodinâmico do sistema (quedas de pressão, etc). Uma das formas considera as duas fases do líquido operante em separado, outra forma de abordagem (segundo Collier [23]) trata-o como sendo homogêneo e portanto não distingue as duas fases. É este o modelo usado no estudo apresentado.

O principal problema na análise de sistemas de termossifão é não saber, a priori, qual o caudal mássico. Este problema é resolvido através de processos iterativos. Apresentam-se de seguida alguns gráficos (Gráfico 1, Gráfico 2, Gráfico 3, Gráfico 4) que ilustram os resultados do estudo efectuado:

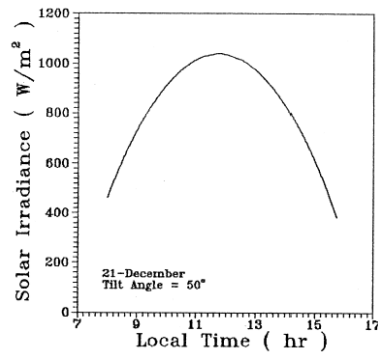


Gráfico 2 Radiação solar ao longo do período

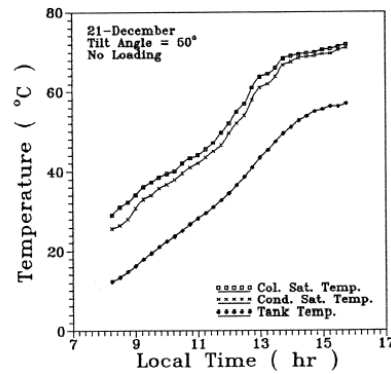


Gráfico 1 Temperaturas de saturação no condensador e colector em função da temperatura no tanque (sem consumo)

Embora a radiação solar atinja um pico a temperatura do tanque aumenta sempre, uma vez que não há consumo nem entrada de água fria.

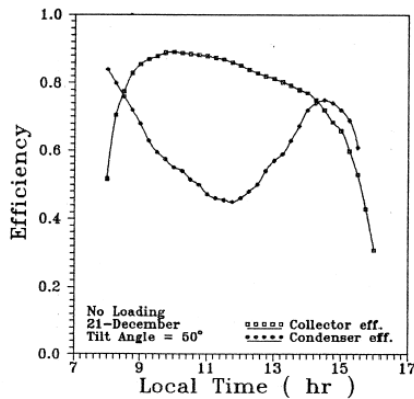


Gráfico 4 Eficiência do colector e condensador ao longo do período (sem consumo)

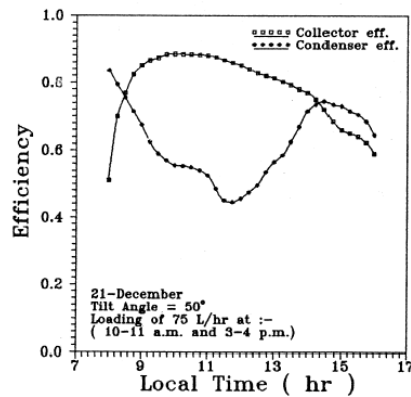


Gráfico 3 Eficiência do colector e condensador ao longo do período (com consumo)

Como esperado a eficiência do colector é tanto maior quanto a radiação incidente. O comportamento do condensador é inverso, quanto menor a temperatura mais eficientemente liberta calor.

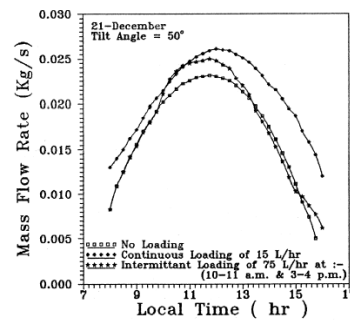


Gráfico 5 Caudal observado ao longo do dia

O caudal segue a mesma tendência da radiação solar incidente (Gráfico 5).

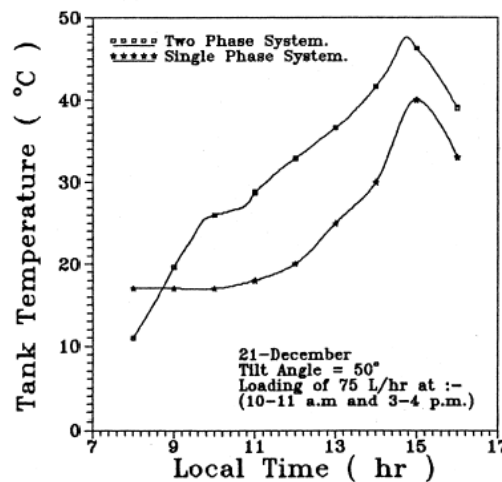


Gráfico 6 Temperatura atingida no tanque nos dois sistemas ao longo do período (com consumo)

O Gráfico 6 demonstra as vantagens de um sistema de duas fases face a um sistema de uma fase.

Podemos, através da análise destes gráficos, concluir que um sistema de duas fases é mais vantajoso face a um sistema simples, podendo até superar um sistema de circulação forçada.

1.3.4.7 Modelação de um sistema solar integrado

Uma outra pesquisa, levada a cabo por Marwa M. Hassana e Yvan Beliveau ("Modeling of an integrated solar system") [25], demonstra a viabilidade de um sistema solar constituído por colectores solares planos, integrados numa estrutura de betão orgânica ao próprio edifício, e de um sistema de acumulação em PCM. PCM é um material inovador que possui uma grande energia na forma de calor latente, libertando essa energia quando muda de fase (líquido-sólido e sólido-líquido). Este método de acumular energia permite o uso de menos quantidade de material no reservatório e é muito mais eficiente o armazenamento da mesma. Analisando, por exemplo o betão, tem

um calor latente de 1.0 kJ/kg, muito baixo quando comparado ao cloreto de cálcio 190 kJ/kg [12].

Dado a sua eficiência este sistema permite reduzir até 30% da área de colectores solares, face a um sistema de acumulação normal.

No entanto, para o estudo referido, veio-se a concluir que este sistema de armazenamento não era económico, nesta aplicação. O sistema estudado consiste num grupo colector de colectores de baixo custo, um armazenamento em PCM, desumidificador, piso radiante, e todos os componentes auxiliares. Os colectores solares foram projectados e testados através de técnicas de simulação numérica, o algoritmo foi programado em C++ [28] e serviu de ligação entre os modelos de consumo de energia calculados no Energy Plus, com os modelos de elementos finitos dos colectores e armazenamento, efectuados no ABAQUS [27] (Figura 23).

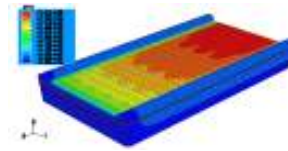


Figura 23 Modelo de elementos finitos, do colector

A conjugação óptima de parâmetros de caudal e temperatura de saída dos colectores foi também estudada de maneira a obter o maior ganho energético. Deste modo, neste estudo, obtiveram-se valores de 0.005 m³/h e 0.05m³/h para o Inverno e 0.1m³/h no Verão.

A conclusão do estudo demonstrou que o sistema, em média, conseguia cobrir as exigências energéticas de climatização e aquecimento de águas em 88%. No entanto, o armazenamento em PCM é um investimento que prejudica a aceitação do sistema, devido ao elevado custo.

1.3.4.8 Análise transitória de um fluido circulante solar

Como anteriormente mencionado, um sistema real de colectores solares implica uma dependência do factor tempo. As análises transitórias são então as mais recomendadas. T. Gyanaprakash, R. Varadharaju, Yap Chee Kian, Z.A. Zainal, G.A. Quadir, Zahid Akhtar Khan, P.A. Aswathanarayana, K.N. Seetharamu, [14] levaram a cabo um estudo que considera um aspecto negativo nos



Fig. 1. Liquid solar collector.

colectores planos, já que estes dependem da sua inclinação para promover a sua óptima utilização. Consideraram então um sistema mais simples constituído por tubos pintados com uma tinta escura expostos ao sol não necessitando de regulações angulares. Defendem que a vantagem reside na absorção da energia, uma vez que neste caso o líquido absorve directamente. A análise numérica é alicerçada em equações matemáticas na quarta ordem do método de Runge-Kutta. Numa primeira análise estática, verificou-se o esperado; a variação da temperatura segue copiosamente a variação de fluxo solar. O

Figura 24 Líquido solar nos colectores

mesmo se verifica, embora com um delay associado á inclusão do tempo, com uma análise dinâmica. Ver Figura 25 e Figura 26.

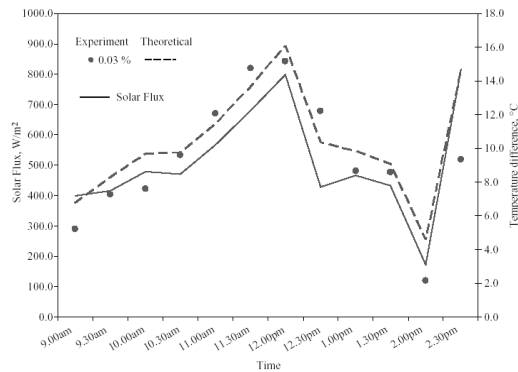


Figura 25 Variação da temperatura com a variação de fluxo solar (análise estacionária)

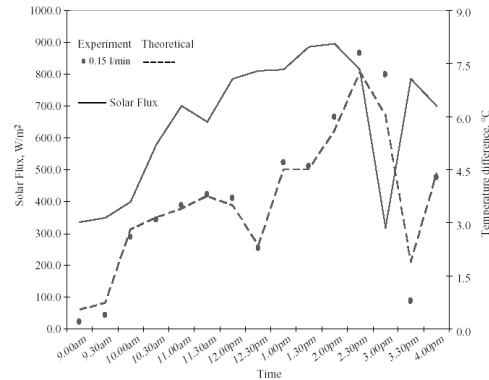


Figura 26 Variação da temperatura com a variação do fluxo solar (análise dinâmica)

Foi também levado em conta a interacção fluído/parede. Com esta análise conclui-se que a estagnação de valor de temperatura é atingido ao mesmo tempo na parede do tubo e no fluído (Figura 27), sendo que a temperatura no fluído é mais elevada uma vez que, segundo os autores, é o fluído que absorve energia e não a parede como no caso dos colectores planos.

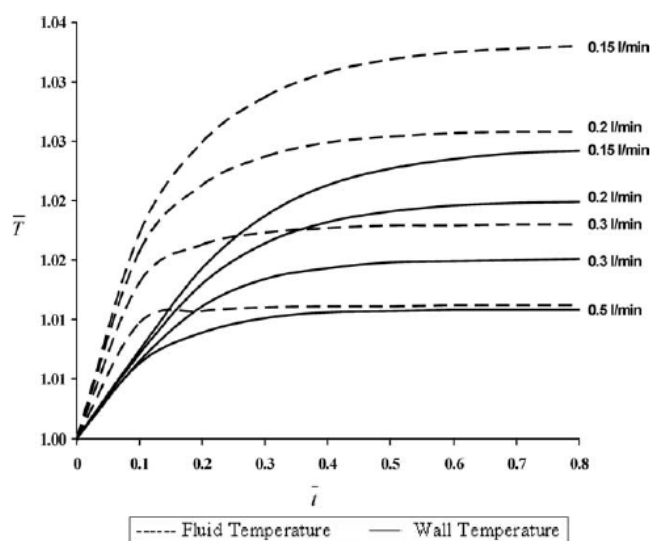


Figura 27 Temperaturas na parede do tubo e no fluído em vários tempos

1.3.5 Os softwares:

Num processo de simulação o uso de softwares é indispensável. É a maneira que menos erros envolve e que promove um resultado mais preciso. Vimos nesta apresentação alguns softwares capazes de fazer uma análise dinâmica de um sistema energético. Foram eles: Energy Plus, C++, Fortran99, Simulink, ABAQUS e TRNSYS.

1.3.5.1 TRNSYS

De todos, este o mais popular e usado é o TRNSYS, ou “transis”, derivado da sua capacidade de efectuar uma análise transitória. Este software possui uma estrutura modular. Reconhece a linguagem de um determinado sistema e os componentes que o utilizador escolhe e maneira como os relaciona. Possui livrarias de componentes usuais em circuitos eléctricos ou térmicos, assim como *inputs* de clima ou outros parâmetros dependentes do tempo. Permite também a conexão a outros programas como o Excel ou o Matlab. O TRNSYS é escrito com base numa linguagem FORTRAN e tem o seguinte aspecto gráfico (Figura 28).

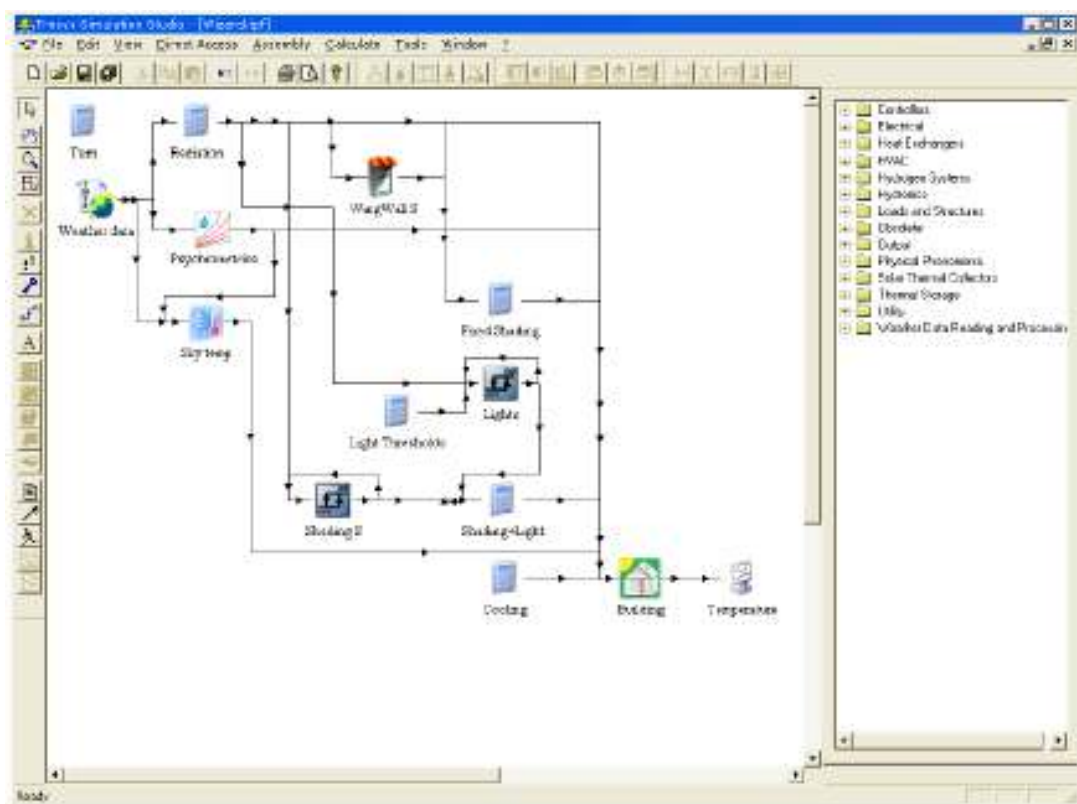


Figura 28 Projecto no TRNSYS

1.3.5.2 Energy Plus

O Energy Plus [16] demonstrou ser um pouco limitado e está ainda numa fase de desenvolvimento. Tem uma grande desvantagem á partida, que é a falta de um interface user-friendly, que o torna mais sombrio. É um modelo computacional que permite simular sistemas de climatização, de capacidade térmica de edifícios, condições meteorológicas, e que é capaz de trabalhar com intervalos de 10min a 1h. Recentemente foram adicionados os módulos fotovoltaicos e de aquecimento e águas, promovido pela crescente procura e implementação destas tecnologias. É possível considerar os efeitos sombreadores de construções vizinhas, do próprio edifício sobre si mesmo, dos próprios colectores solares sobre si mesmos, ou outros obstáculos; a radiação solar é calculada com base no modelo anisotrópico de Perez.

No que toca aos PV, há 3 modelos em que todos têm como objectivo a determinação de um algoritmo matemático para prever a produção de electricidade:

- **Modelo simples**

Neste modelo é o utilizador que arbitra as eficiências dos colectores e inversores. É um bom modelo para utilizar numa primeira abordagem, não muito exigente.

- **Modelo do díodo equivalente**

Este modelo pertence também ao TRNSYS e foi importado para esta versão do Energy Plus. O modelo considera a transformação do sistema fotovoltaico num sistema eléctrico com uma fonte de corrente (incidência solar), um díodo e uma ou duas resistências.

- **Modelo Sandia**

Este modelo é o mais empírico dos três e usa resultados de testes efectuados, na sua análise. Dados os coeficientes e características do módulo solar, o modelo calcula 5 pontos da curva corrente/tensão. Tal como o modelo anterior, este foca a sua análise num módulo.

O Energy Plus não trabalha com os inversores ou baterias

Na secção de solar térmico, existe um banco de dados de fabricantes de colectores certificados. O programa permite aplicar o solar térmico para aquecimento de águas. Como anteriormente afirmado, uma parte importante do sistema solar é o sistema de armazenamento. Embora a versão actual não contemple esta área, a sua inclusão está prevista para futuras versões.

É mais um software possível de ser usado, embora ainda necessite de upgrades visto não abranger todas as aplicações possíveis dos sistemas solar térmico e fotovoltaico.

1.3.5.3 C++ e FORTRAN99

O C++ e FORTRAN são compiladores de programação puros, ou seja, não são modulares e exigem o conhecimento da sintaxe de programação. No entanto, são os alicerces dos outros programas modulares.

1.3.5.4 Math Cad

Usado no modelo de Equivalente Thermal Network, este software também permite trabalhar com a variável tempo e com equações diferenciais, sendo também possível o *output* de gráficos.

1.3.5.5 Simulink (Matlab)

O Simulink é também um programa modular que permite, através de blocos, montar um sistema dinâmico. É um instrumento do Matlab sendo necessário a instalação dos dois para que o Simulink funcione. Não tanto como o TRNSYS, foi também escolhido para levar a cabo estudos dinâmicos.

O primeiro passo é fazer a análise energética dos componentes e calcular as equações diferenciais. Mostra-se um exemplo a seguir [29]

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_f &= \frac{1}{C_f} \left[\frac{1}{R_{e2f}} (\theta_e - \theta_f) + \frac{1}{R_{r2f}} (\theta_r - \theta_f) + \omega \rho \sigma \theta_r - \frac{1}{R_{f2e}} (\theta_f - \theta_e) - \omega \rho \sigma \theta_f \right] \\ \dot{\theta}_r &= \frac{1}{C_r} \left[\frac{1}{R_{e2r}} (\theta_e - \theta_r) + \frac{1}{R_{p2r}} (\theta_p - \theta_r) + \omega \rho \sigma \theta_f - \frac{1}{R_{r2f}} (\theta_r - \theta_f) - \omega \rho \sigma \theta_r \right] \\ \dot{\theta}_p &= \frac{1}{C_p} \left[- \frac{1}{R_{p2r}} (\theta_p - \theta_r) \right]\end{aligned}$$

Trabalhando estas equações e as dependências entre elas, chega-se a um aspecto gráfico semelhante ao da Figura 29. Todas as operações matemáticas são possíveis de serem traduzidas em blocos no Simulink.

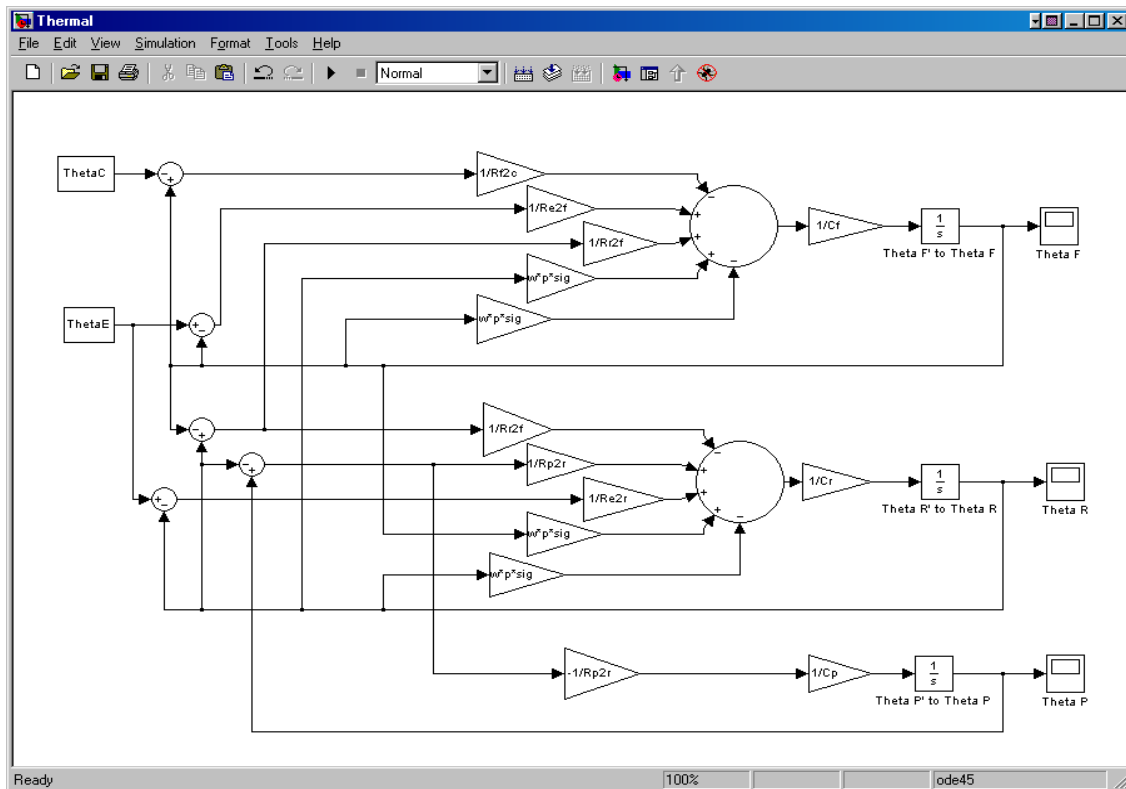


Figura 29 Esquema do Simulink traduzindo as equações diferenciais

Um outro exemplo Figura 30 [30], do cálculo de custos no aquecimento de uma casa, apresenta-se de seguida:

Primeiramente são definidas as características técnicas e valores de referência no próprio Matlab®. Após uma construção mental da ligação entre os componentes é necessário construir esses componentes individualmente.

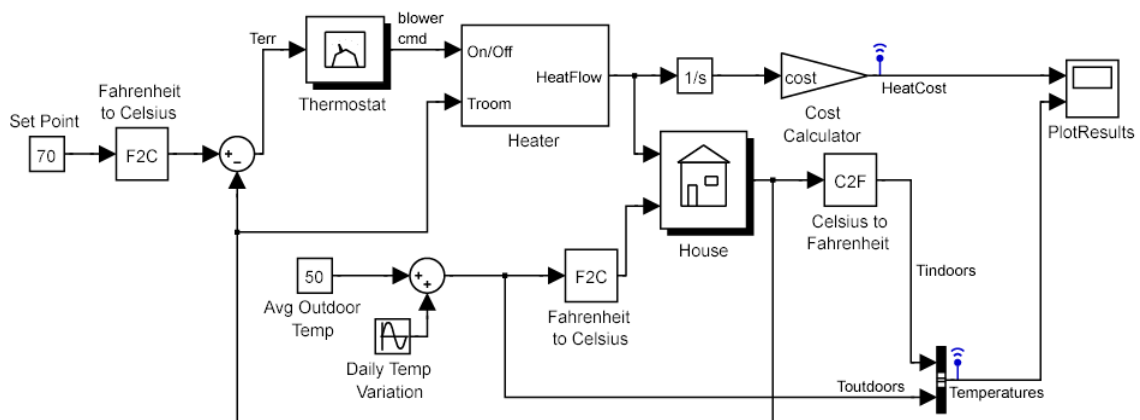


Figura 30 Esquema do projecto em Simulink

Um dos elementos usados é um termóstato que controla o funcionamento (ligação) do sistema de aquecimento. É representado por os blocos da Figura 31:

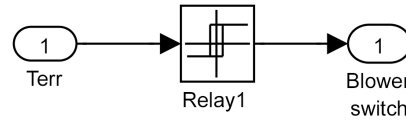


Figura 31 Esquema de blocos do termóstato

O aquecedor de ar Figura 32, mantém um fluxo constante de ar quente, para o ambiente e é controlado pelo termóstato.

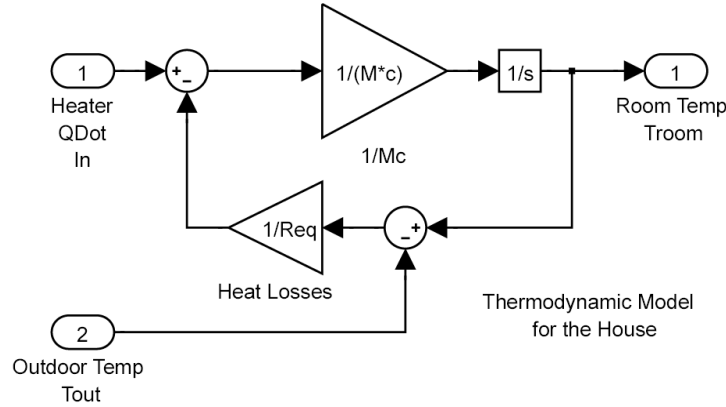


Figura 32 Aquecedor de ar

O aquecedor é regido pelas seguintes equações:

$$\frac{dQ}{dt} = (T_{heater} - T_{room}) - M_{dot} \cdot c$$

$$\frac{dQ}{dt} = \text{heat flow from heater into the room}$$

c = heat capacity of air at constant pressure

M_{dot} = air mass flow rate through heater (kg/hr)

T_{heater} = temperatures of hot air from heater

T_{room} = current room air temperature

$$\left(\frac{dQ}{dt} \right)_{losses} = \frac{T_{room} - T_{room}}{R_{eq}}$$

$$\frac{dT_{room}}{dt} = \frac{1}{M_{air} \cdot c} \left(\frac{dQ_{heater}}{dt} - \frac{dQ_{losses}}{dt} \right)$$

M_{air} = mass of air inside the house

R_{eq} = equivalent thermal resistance of the house

Por fim, é possível analisar os resultados da simulação na Figura 23:

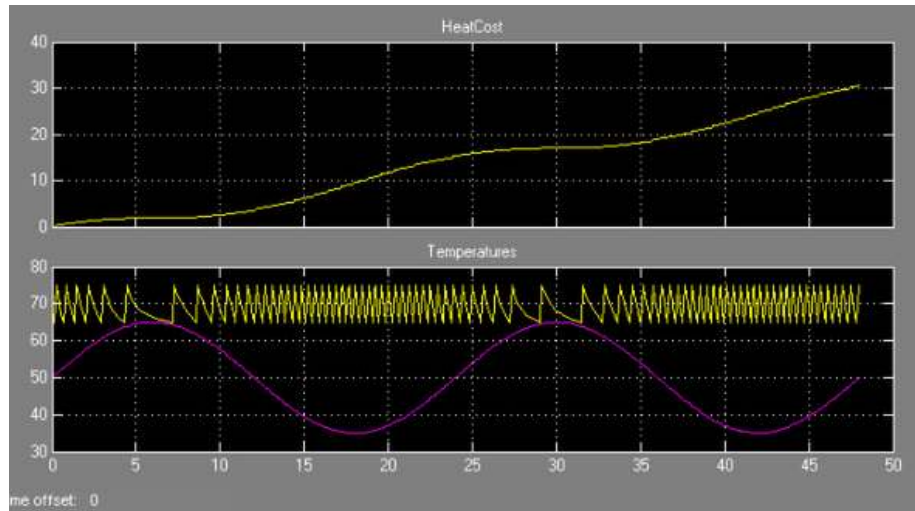


Figura 33 Resultado da simulação

1.4 Problemas reais, opiniões reais:

1.4.1 António Batista

Foram abordadas algumas análises e diferentes maneiras de abordar o problema. A implementação de um sistema solar térmico em apartamentos implica uma análise cuidada do sistema como um todo e não focar o estudo apenas nos componentes individualmente. Pelo facto de ser um testemunho real, em Portugal e resumir os entraves possíveis de serem encontrados na instalação de um destes sistemas, expõe-se aqui o relato de António Batista [31]. Uma das experiências passadas por este técnico, mostrou a possibilidade e vantagens de ligar colectores e reservatórios em paralelo ou série, e os diferentes resultados obtidos. Numa determinada instalação, os colectores passaram de paralelo para ligação em série. Se esta medida tivesse sido projectada previamente economizar-se-iam 80% de custos, mão-de-obra e tubagens. Os reservatórios também apresentavam uma ligação em paralelo, sofrendo choques térmicos cada vez que era injectada água proveniente da rede. A resolução passaria por mudar conectá-los paralelamente. Como se veio a concluir, esta medida mostrou ser 50%

mais eficiente. Este modo de emprego de reservatórios designa-se por série em contra corrente. Usa-se um degrade de temperaturas para evitar choques térmicos. A temperatura da água da rede, mais baixa, encontra um primeiro depósito e a água é aí armazenada. Quando solicitada, a água passa para um segundo depósito onde já existe uma serpentina permutadora de calor (do colectores solar) e aquece a água, ainda que a uma temperatura baixa. Da mesma maneira, quando solicitada, a água passa então para o reservatório 1, onde existe a máxima troca de calor. Deste modo, a água vai sendo aquecida progressivamente, otimizando assim o funcionamento dos colectores.

Como se vê, existem problemas aparentemente simples de resolver e que não exigem tecnologia de ponta ou elevados conhecimentos científicos. É uma questão de fazer uma análise energética prévia do sistema e assim conseguir encontrar o melhor modo de ligação.

1.4.2 Soluções/opiniões de fabricantes

Um testemunho real e de uma empresa que está neste ramo de negócio é uma mais valia.

- Bright Solar [32], representada por Carlos Jesus afirma: “põe-se a questão do totalmente centralizado, totalmente descentralizado ou misto. Pensamos que os sistemas totalmente centralizados fazem efectivamente sentido quando o condomínio se constitui como vendedor de água quente, dispondo para isso de uma caldeira centralizada e que garanta disponibilidade de água à temperatura de 60°C. O condomínio terá depois de encontrar o preço por m³ a 60°C. Os sistemas parcialmente descentralizados não nos parecem ser de todo adequados até porque criam algumas zonas cinzentas quanto à responsabilidade de manutenção dos equipamentos. Os sistemas descentralizados são sem dúvida os mais adequados e com menores custos energéticos para os clientes mas são simultaneamente os mais caros.”
- Na opinião de Simon Mallet, da Solar Kent, já aqui previamente referida, o sistema centralizado tem mais vantagens.

1.5 Contribuição da Tese

Procura-se com este trabalho dar resposta a questões simples tais como: quanto colectores se devem colocar para atingir determinada temperatura, qual o volume de armazenamento, quantos tanques, qual o valor ideal de caudal do primário, qual o método mais eficiente de ligar colectores e tanques? São questões de importância vital num projecto de um sistema solar térmico e que podem ser analisadas neste trabalho usando o Simulink como ferramenta. Embora não seja um software interactivo e

generalista como o Retscreen® ou Solterm®, pretende ser mais rigoroso e real já que considera os efeitos de inércia do sistema.

1.6 Organização do texto

A primeira etapa do trabalho consiste em saber o trabalho já desenvolvido nas áreas das energias renováveis, nomeadamente, na solar térmica, novos processos, análises e métodos de aproveitamento desta fonte renovável que é o sol.

Seguidamente, define-se o sistema a ser simulado e é efectuada uma análise energética de todos os componentes que o compõem. Seguida de uma análise numérica é realizada uma analítica. Pelo facto de algumas equações serem sistemas realimentados e equações diferenciais, a sua resolução é atribuída a um software capaz de aplicar de uma maneira algorítmica, métodos numéricos na resolução deste problema. O software escolhido é o Simulink, que usa como base o Matlab®

O próximo passo será adaptar as equações e relações ao ambiente Simulink, criar controlos, válvulas, canais de alimentação (que correspondem a tubos e cabos num sistema real). Depois de cada componente funcionar de uma maneira transitória, o sistema está apto a ser testado, esse será a próxima etapa.

Testa-se o sistema, alterando cada componente individualmente e registando a alteração que este causa ao sistema final. Neste ponto, a análise restringe-se ao período de um dia, dado que é uma análise qualitativa com o intuito de saber como cada componente influencia o sistema e não quanto o influencia. Verificar-se-á a contribuição que cada alteração provoca e o resultado atingido. Mediante estes resultados, é definido um caso de estudo e são levados a cabo vários testes que visam otimizar o sistema. Esta optimização tem em vista minorar os kWh consumidos por um sistema de aquecimento auxiliar num ano.

Numa última abordagem, são descritos outros softwares, capazes de efectuar uma análise energética, ou mesmo económica, a sistemas solares térmicos, fotovoltaicos e outros. Aqueles que mais destaque merecem neste trabalho são o Retscreen® e o Solterm®, sendo que este último é o mais proeminente software a nível nacional, sendo o referido no RCCTE. O objectivo da incorporação destes softwares no trabalho visa comparar os resultados fornecidos por cada um. Serão usados, sempre que possível, parâmetros de entrada iguais nos três softwares, verificando posteriormente o resultado de cada um e tentando obter um valor óptimo com o modelo criado.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Antes de se começar a usar o software é inevitável compreender o comportamento do sistema do ponto de vista energético. A compreensão dos balanços de energia de cada componente é fundamental para que posteriormente se possa traduzir em equações e algoritmos possíveis de serem implementados no Simulink para se proceder à simulação. Este capítulo trata a análise energética e analítica do sistema.

2.2 Descrição do sistema em estudo

Um sistema colector solar é constituído por três elementos principais como já referido: os colectores solares, tanques de armazenamento e serpentina permutadora de calor.

Cada um destes componentes tem associado uma ou mais equações de balanços energéticos que descrevem o funcionamento de cada um. Existe um circuito primário, que neste trabalho é fechado e portanto não troca massa, onde corre um fluído. Esse fluído absorve calor ao passar nos colectores. Quando passa na serpentina, que por sua vez está dentro do tanque, troca o calor que recebeu no colector para esse mesmo tanque. Por sua vez, a água do tanque aquece ou arrefece consoante a temperatura do primário seja mais elevada ou mais baixa. O ciclo repete-se novamente. Este sistema pode variar de configuração, o circuito primário pode ser consumido directamente, podem haver vários tanques e serpentinas, estas podem trocar calor através de um permutador de placas exterior, etc, sendo que o permutador foi interior foi a configuração usada. Por último, mas não menos importante, foi realizada uma análise extensiva do comportamento do sol e do efeito da sua posição na medição da radiação solar. Este aspecto não referenciado até este ponto pois não representaria um ponto fulcral na análise do problema. No entanto, com o continuar da construção do sistema, surgiu este problema. Os dados de entrada da radiação solar são referentes à radiação solar horizontal directa medida numa estação meteorológica. No entanto, é necessário formular um algoritmo que transforme este valor e que considere o efeito da inclinação e azimute do colector.

2.3 Desenvolvimento das equações constitutivas

2.3.1 Radiação absorvida

Como foi dito previamente, a transformação do valor de radiação solar horizontal em radiação absorvida por um colector com determinada inclinação e azimute é de extrema importância. Importância essa que pode influenciar na fase de projecto, uma

possível implementação de um sistema de posicionamento automático do colector, para optimização de absorção da radiação.

A radiação solar que atinge a Terra tem diferentes componentes; a radiação directa é aquela que incide a terra sem qualquer perturbação, a radiação difusa é a radiação reflectida por partículas de pó e outras, e moléculas de ar. A radiação difusa pressupõe também a radiação reflectida pela superfície terrestre. Podemos ver estas componentes na Figura 34. [36]



Figura 34 Componentes da radiação global

Pode-se, num contexto genérico, afirmar que a radiação difusa comporta 40% da radiação directa. É claro que este valor é meramente qualitativo já que no Inverno ele aumenta de valor (devido a nebulosidade e outros factores que dispersam a radiação) e no Verão é mais baixo.

O Sol é um corpo celeste imóvel, sendo a Terra a responsável pelos dias e noite e estações do ano, devido aos seus movimentos de rotação e translação. O senso comum diz que o Sol nasce a Este e se põe a Oeste. De facto, nem sempre assim o é. Dependendo da localização, o Sol pode nascer perto, mas não exactamente nestas direcções. Para melhor compreender o movimento do Sol existem representações gráficas do movimento aparente do Sol, como se vê na Figura 35 [36].

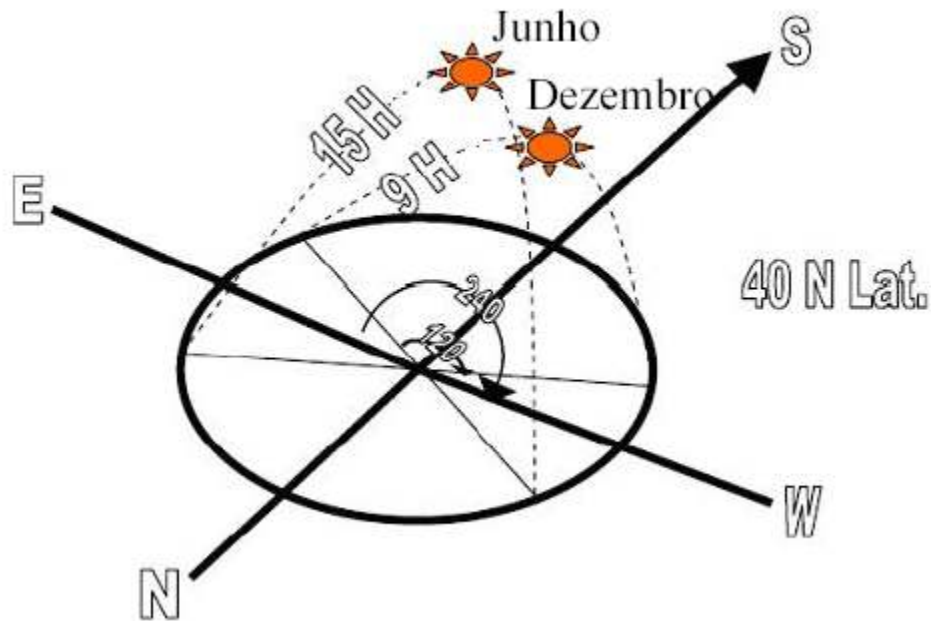


Figura 35 Movimento aparente do Sol nos diferentes Solstícios do ano

Com esta figura conseguimos perceber o porquê de os dias no Verão serem maiores que no Inverno. Tal facto deve-se às diferentes trajectórias do Sol ao longo do ano e à sua altura aparente. No Verão a trajectória do Sol é mais alta que no Inverno. A sua posição é caracterizada pelo azimuth solar e ângulo de inclinação da Terra, também designado por *declination angle* δ , que é o ângulo formado entre o plano do movimento aparente do sol e do plano equatorial. Como verificamos na Figura 36, este parâmetro toma o valor zero nos equinócios (em que a duração do dia é igual à noite, daí o nome de equi-nócio), e de $\pm 23,45^\circ$ nos solstícios de Verão e inverno.

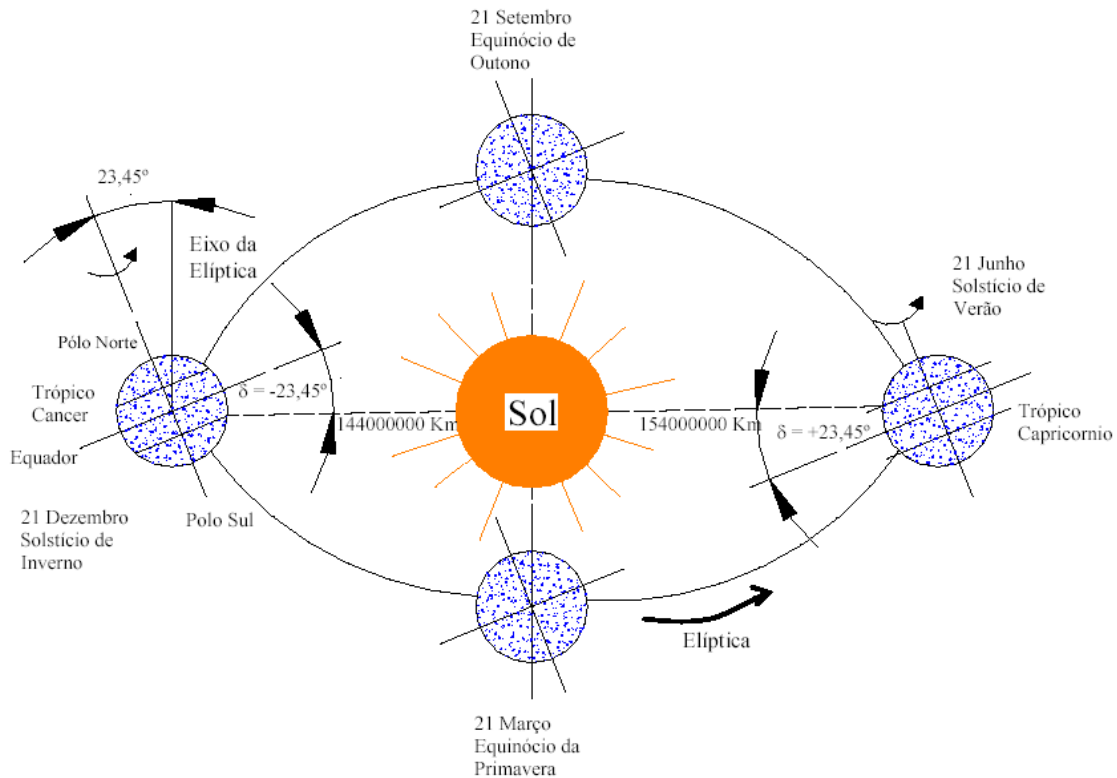


Figura 36 Declinação Solar

Outros parâmetros são importantes para definir a posição do sol. O azimute é o ângulo formado pelo plano vertical passando pelo sol e a direcção do Sul geográfico do local, como se vê na Figura 37; a altura do sol é o ângulo formado pela direcção do sol e o plano horizontal do local, ilustrado na Figura 37; a latitude é uma coordenada que identifica a posição do local em estudo.

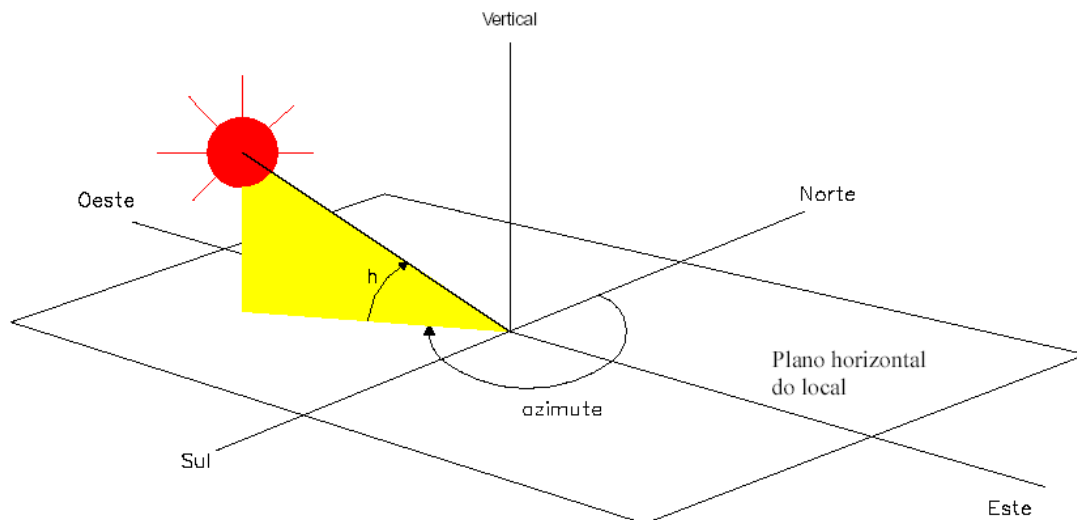


Figura 37 Representação do azimute e altura solar

Para finalizar, procedemos á análise das expressões e relações que confrontam os diversos parâmetros descritos. Os dados disponibilizados neste estudo advêm do Solterm®. São dados de vários parâmetros meteorológicos, entre eles, a radiação solar.

Este valor de radiação traduz-se no valor horizontal; um colector solar pode (e deve) ter uma determinada inclinação e azimuth e portanto é necessário um processo que transforme esse valor horizontal no valor equivalente para uma determinada inclinação e azimuth. O referido algoritmo é na verdade um conjunto de equações e relações trigonométricas que podem ser traduzidas nas seguintes expressões [38].

$$\begin{aligned}\cos(\theta) = & \sin(\delta)\sin(\lambda)\cos(T) - \sin(\delta)\cos(\lambda)\sin(T)\cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta)\cos(\lambda)\cos(T)\cos(\varpi) + \cos(\delta)\sin(\lambda)\sin(T)\cos(\gamma)\cos(\varpi) \\ & + \cos(\delta)\sin(T)\sin(\gamma)\sin(\varpi)\end{aligned}$$

Em que:

$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right)$ [37] é o *declination angle* e n é o número do dia em que se quer calcular δ . Por exemplo, dia 1 de Janeiro n=1, dia 31 Dezembro n=365. Por esta razão, o *declination angle* é um valor médio diário, sendo o ângulo de zenithe, descrito mais abaixo, o que expressa um valor horário.

γ - azimuth do colector

λ - latitude

T – inclinação do colector

ϖ - hour angle. Hour angle é medido em graus e tem o valor de 0° ao meio-dia solar. A cada hora que precede o meio-dia, o valor é de -15° a cada hora, passando-se o contrário com as horas da tarde. Assim, este parâmetro varia de -165° a 180°.

A radiação inclinada é calculada multiplicando a radiação directa normal por este valor. Esta radiação por sua vez pode ser calculada dividindo a radiação directa horizontal por o valor de coseno de ângulo de zenithe que se expressa por:

$$\cos(Z) = \sin(\lambda)\sin(\delta) + \cos(\lambda)\cos(\delta)\cos(\varpi)$$

O ângulo de zenithe expressa o valor do ângulo formado entre o plano do movimento aparente do sol e do plano equatorial.

Tendo estas relações torna-se compor uma equação final (1) que relacione a radiação directa horizontal com a que é realmente é absorvida no colector. Outros processos e equações existem para este cálculo, mas após alguns testes esta é a que melhor resultados oferece.

$$Q = Q_{hori} \frac{\cos(\theta)}{\cos(Z)} \quad (1)$$

No entanto, a radiação total absorvida na superfície inclinada é uma soma da radiação directa e da radiação difusa. Deste modo, a expressão (2) da radiação total absorvida fica:

$$Q_{total} = Q_{directa} \cdot R_b + Q_{difusa} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (2)$$

Inerentemente, existe um potencial de optimização do sistema também por esta via, sendo que a melhor solução do ponto de vista energético seria um sistema com posicionamento autónomo, de acordo com a posição do sol.

Demonstradas as equações apresentam-se gráficos que testemunham o bom funcionamento do sistema, qualitativamente. O Gráfico 7 apresenta os valores de radiação horizontal disponibilizados pela base de dados do Solterm. O Gráfico 8 ilustra o efeito de ter uma elevada inclinação dos colectores. Como foi explicado, no Verão o Sol apresenta um percurso mais alto, estando o colector muito inclinado (70°) a radiação absorvida será menor, tal como confere o gráfico, beneficiando por outro lado o Inverno. Outros testes poderiam ser feitos, mas este é um bom indicador da correcta aplicação das fórmulas.

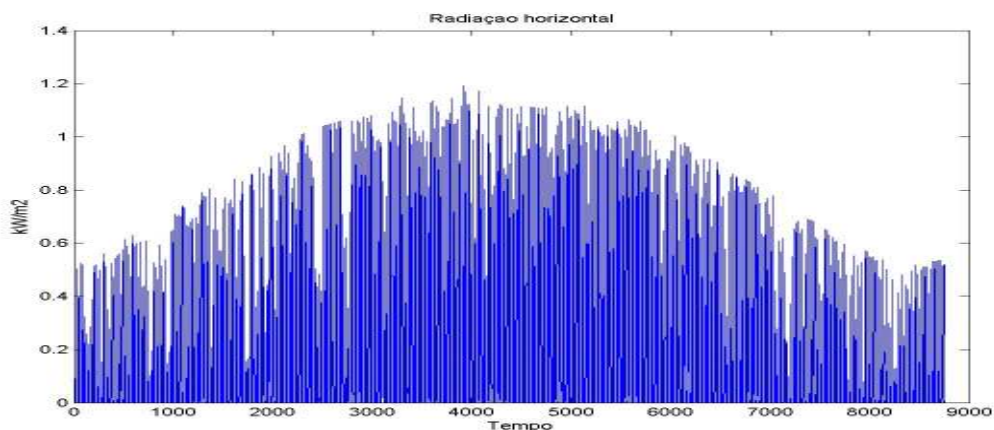


Gráfico 7 Radiação horizontal

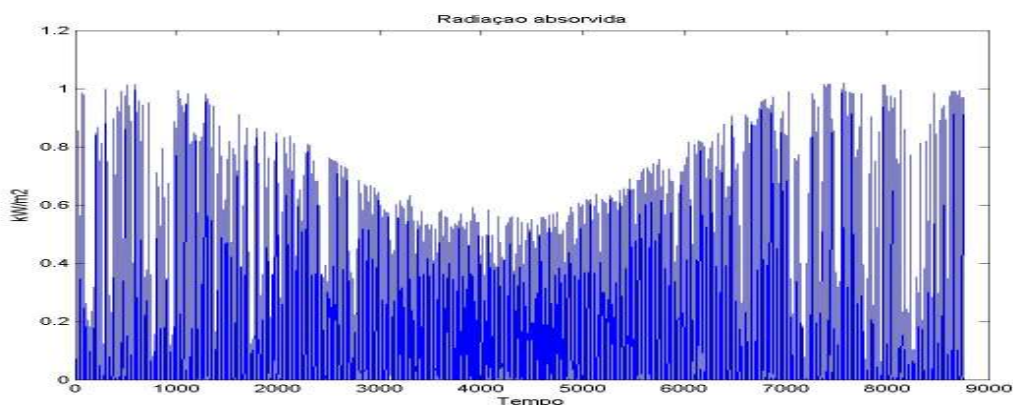


Gráfico 8 Radiação absorvida

O mesmo efeito se afere no azimuth. O Gráfico 9 mostra os valores de radiação absorvida com um azimuth de colector de 0° . O Gráfico 10 mostra como com a mesma inclinação, um azimuth de 80° altera o resultado. Presume-se assim uma boa capacidade do sistema simular o que se passa na realidade.

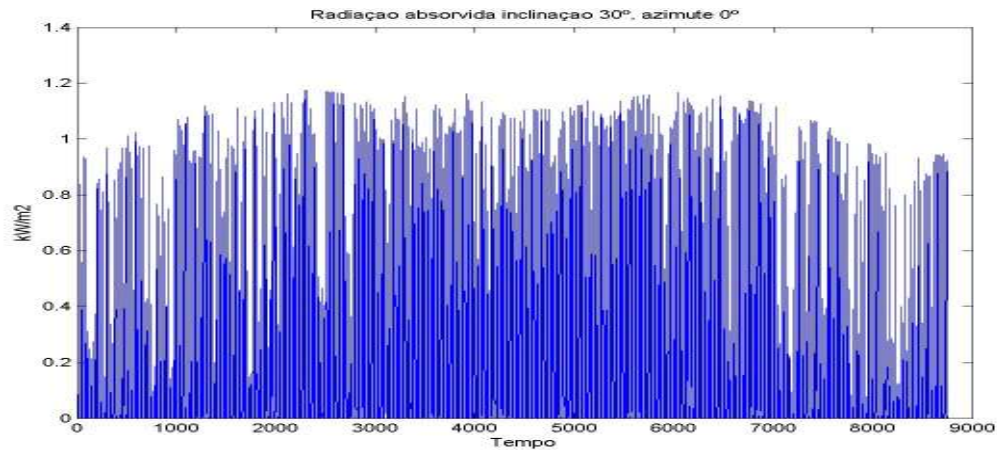


Gráfico 9 Radiação absorvida com azimuth 0°

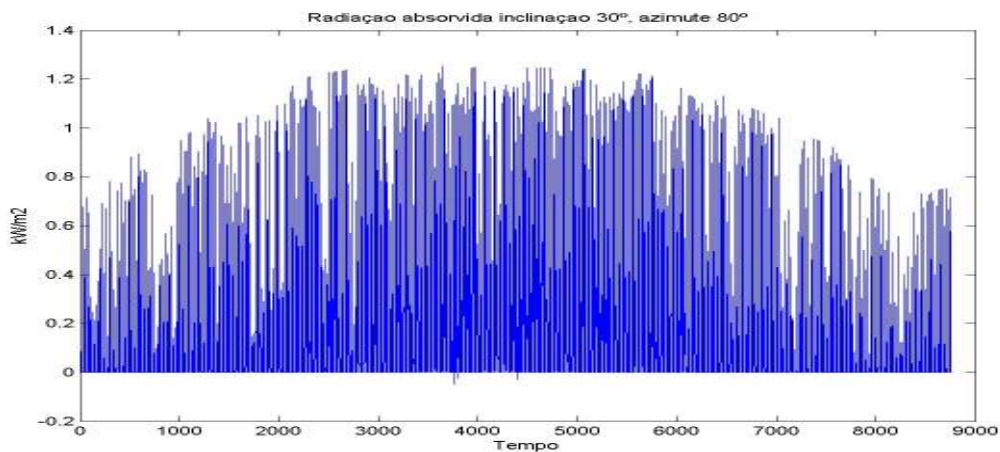


Gráfico 10 radiação absorvida com azimuth 80°

2.3.2 Consumo

O consumo de água quente requer também alguma atenção. O RCCTE indica como valor de consumo diário de água quente de referência, 40L de água a 60°C por pessoa (Capítulo V, Artigo 14º, alínea c)). Como foi aclarado previamente, a temperatura da água á saída da torneira é de 40°C (assumido como temperatura de conforto). Ora, fazendo a conta inversa, inferimos que este valor corresponde a 72L a 40°C (3). Uma família de quatro pessoas deve então gastar até 288L de água a 40°C .

$$\begin{aligned}
 x \cdot 60 + (1 - x) \cdot 15 &= 40 \Leftrightarrow x = 0.555 \\
 40 + (40 \cdot (1 - 0.555) / 0.555) &= 72
 \end{aligned} \tag{3}$$

2.3.3 Colector Solar

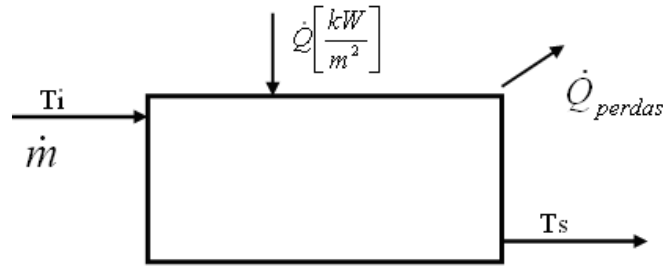


Figura 38 Esquema energético do coletor solar

Como se pode constatar, o sistema é aberto e permite a troca de calor e de massa. A massa que entra é igual à massa que sai pois o caudal é constante. O fluído circulante entra no coletor a uma temperatura T_i e sai, após absorver calor, a uma temperatura T_s , valor variante no tempo e que se pretende conhecer e isolar na expressão diferencial. O coletor tem associado a si dois factores designados por rendimento óptico (F_n) e coeficiente de perdas (F_u) e estes factores são responsáveis pela maior ou menor eficácia dos colectores, sendo que, quanto maior o F_n e menor o F_u , mais eficaz o coletor. A radiação recebida, proveniente do sol, tem de ser multiplicada pela área útil do coletor e pelo seu rendimento, que é composto pelos factores já mencionados e se representa pela equação (4):

$$\eta = F_n - F_u \times \frac{\Delta T}{Q} \tag{4}$$

$$\Delta T = T_{\text{fluido}} - T_{\text{ambiente}}$$

$$Q = \text{radiação} \left[\frac{kW}{m^2} \right]$$

Temos então a expressão diferencial representativa do coletor:

$$V \cdot \rho \cdot cp \cdot \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}(t) \cdot A \cdot \eta - \dot{m}(t) \cdot cp \cdot (T_s - T_i) = \dot{Q}(t) \cdot A \cdot F_n - F_u \cdot A \cdot (T_s - T_a(t)) - \dot{m}(t) \cdot cp \cdot (T_s - T_i)$$

Nesta análise é desprezada a perda de calor entre placa e fluído assim como a inércia térmica da placa, visto que são valores baixos comparativamente à magnitude dos restantes.

2.3.4 Tanque

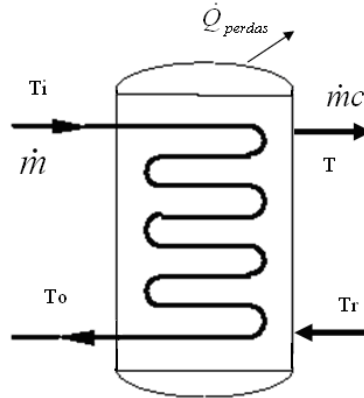


Figura 39 Esquema do esquema energético do tanque reservatório

A análise efectuada para o tanque (Figura 39) é em tudo semelhante á do colector com os respectivos acrescentos de entradas e saídas. Assim, e observando a figura, existem 2 entradas: a água de entrada no tanque a uma temperatura T_r e que ao ser aquecida sai para consumo a um caudal \dot{m}_c e a uma temperatura T , valor variante no tempo e que se pretende conhecer. Por outro lado existe uma serpentina onde circula o fluído solar com um caudal \dot{m} que entra no tanque (dentro da serpentina) a uma temperatura T_i e sai, após perder calor para a água, a uma temperatura T_o . O calor perdido deve-se á convecção e condução nas paredes do tanque e pode ser representado por (5): $Q_{perdas} = \frac{T_{tanque} - T_{ambiente}}{R_t}$ (5), em que $R_t = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{KA} + \frac{1}{h_2 A}$ é a resistência térmica total.

Tem de ser incluída na análise, a serpentina, pois é através do estudo da mesma que é possível conhecer T_o . Assim sendo, e sabendo que a serpentina tem um determinado rendimento (6):

$$\eta = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_{tanque}} \quad (6) \Leftrightarrow T_o = T_i - \eta \cdot (T_i - T)$$

A equação do balanço energético do tanque é então uma equação diferencial:

$$mt \cdot cp \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{m}(t) \cdot cpf \cdot (T_i - T_o) - \dot{m}_c(t) \cdot cp \cdot (T - T_r) - \frac{T - T_a(t)}{R_t}$$

Temos então duas expressões que representam o tanque e por inerência a serpentina permutadora de calor, e colector de um sistema colector solar.

2.3.5 Problemas encontrados

Antes de se obterem estas equações foi resolvido o problema analiticamente, no entanto, facilmente se concluiu que seria impraticável uma vez que se verificou que alguns parâmetros que foram considerados na análise como constantes, eram na verdade também eles dependentes do tempo, como por exemplo, o consumo \dot{m}_c , o caudal do primário \dot{m} a radiação solar Q e a temperatura ambiente T_a . A solução do problema dispensa a resolução analítica da expressão e usa o Simulink como ferramenta de resolução automática deste tipo de equações (7):

$$\frac{dT}{dt} = P(t).T + Q(t) \quad (7)$$

A título de curiosidade apresenta-se o caminho improdutivo que se começou por seguir:

COLECTOR:

$$\begin{aligned} V.\rho.cp.\frac{dT_s}{dt} &= \dot{Q}.A.\eta - \dot{m}.cp.(T_s - T_i) = \dot{Q}.A.F_n - F_u.A.(T_s - T_a) - \dot{m}.cp.(T_s - T_i) \\ &= \dot{Q}.A.F_n - F_u.A.T_s + F_u.A.T_a - \dot{m}.cp.T_s + \dot{m}.cp.T_i \\ \Leftrightarrow V.\rho.cp.\frac{dT_s}{dt} &= \dot{Q}.A.F_n + F_u.A.T_a + \dot{m}.cp.T_i - T_s.(\dot{m}.cp + F_u.A) \\ \Leftrightarrow \frac{1}{\dot{Q}.A.F_n + F_u.A.T_a + \dot{m}.cp.T_i - T_s.(\dot{m}.cp + F_u.A)} dT_s &= \frac{1}{V.\rho.cp} dt \\ \Leftrightarrow \frac{\log(\dot{Q}.A.F_n + F_u.A.T_a + \dot{m}.cp.T_i - T_s.(\dot{m}.cp + F_u.A))}{-\dot{m}.cp - F_u.A} + C1 &= \frac{t}{V.\rho.cp} + C2 \\ \Leftrightarrow \log(\dot{Q}.A.F_n + F_u.A.T_a + \dot{m}.cp.T_i - T_s.(\dot{m}.cp + F_u.A)) &= \left(\frac{t}{V.\rho.cp} + C3 \right) (-\dot{m}.cp - F_u.A) \\ \Leftrightarrow -T_s.(\dot{m}.cp + F_u.A) &= e^{(\dot{m}.cp + F_u.A).(\frac{t}{V.\rho.cp} + C3)} - \dot{m}.T_i - F_u.A.T_a - \dot{Q}.A.F_n \\ \Leftrightarrow T_s &= \frac{e^{(-\dot{m}.cp - F_u.A).(\frac{t}{V.\rho.cp} + C3)}}{-\dot{m}.cp - F_u.A} + \frac{-\dot{m}.T_i - F_u.A.T_a - \dot{Q}.A.F_n}{-\dot{m}.cp - F_u.A} \end{aligned}$$

Sendo $C3$ afectado pelas condições iniciais, $t=0$ $T_s=T_i$

$$C3 = \frac{-\log(\dot{Q}.A.F_n + F_u.A.T_a + \dot{m}.cp.T_i - T_i.(\dot{m}.cp + F_u.A))}{\dot{m}.cp + F_u.A}$$

TANQUE:

$$\begin{aligned}
mt.cp. \frac{dT}{dt} &= \dot{m}.cpf.(Ti - To) - \dot{m}c.cp.(T - Tr) - \frac{T - Ta}{Rt} \\
\Leftrightarrow mt.cp. \frac{dT}{dt} &= \dot{m}.cpf.(\eta.Ti - \eta.T) - \dot{m}c.cp.(T - Tr) - \frac{T - Ta}{Rt} \\
\Leftrightarrow mt.cp. \frac{dT}{dt} &= \dot{m}.cpf.\eta.Ti - \dot{m}.cpf.\eta.T - \dot{m}c.cp.T + \dot{m}c.cp.Tr - \frac{T}{Rt} + \frac{Ta}{Rt} \\
\Leftrightarrow mt.cp. \frac{dT}{dt} &= T.(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt}) + \dot{m}.cpf.\eta.Ti + \dot{m}c.cp.Tr + \frac{Ta}{Rt} \\
\Leftrightarrow \frac{1}{T.(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt}) + \dot{m}.cpf.\eta.Ti + \dot{m}c.cp.Tr + \frac{Ta}{Rt}}.dT &= \frac{t}{m.cp}.dt \\
\Leftrightarrow \frac{\log\left(T.(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt}) + \dot{m}.cpf.\eta.Ti + \dot{m}c.cp.Tr + \frac{Ta}{Rt}\right)}{-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt}} + C1 &= \frac{t}{m.cp} + C2 \\
\Leftrightarrow T.(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt}) + \dot{m}.cpf.\eta.Ti + \dot{m}c.cp.Tr + \frac{Ta}{Rt} &= \\
= e^{\left(\frac{t}{m.cp} + C3\right).(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt})} - \dot{m}.cpf.\eta.Ti - \dot{m}c.cp.Tr - \frac{Ta}{Rt} & \\
\Leftrightarrow T = \frac{e^{\left(\frac{t}{m.cp} + C3\right).(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt})} - \dot{m}.cpf.\eta.Ti - \dot{m}c.cp.Tr - \frac{Ta}{Rt}}{(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt})} & \\
C3 = \frac{\log\left(Tr.(-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt}) + \dot{m}.cpf.\eta.Ti + \dot{m}c.cp.Tr + \frac{Ta}{Rt}\right)}{-\dot{m}.cpf.\eta - \dot{m}c.cp - \frac{1}{Rt}} &
\end{aligned}$$

2.4 Resumo do Capítulo 2

O sistema foi implementado no Simulink, com base numa análise modular. Cada componente foi analiticamente descrito e formulado de maneira a conseguir traduzir a realidade através de equações. Ao serem obtidas essas equações o software resolve-as numericamente podendo assim receber as entradas, que fazem parte do sistema, e devolver os *outputs* pretendidos.

CAPÍTULO 3: MODELO NUMÉRICO E FERRAMENTA COMPUTACIONAL USADA

3.1 Introdução

Como já foi mencionado, o sistema não pode ser resolvido numa base analítica pois é um sistema iterativo que depende dos resultados de saída como parâmetros de entrada. A sua resolução passa então por usar um modelo numérico. Este modelo numérico é solucionado usando um software. Pelas suas características transitórias, o Simulink[®] foi o software escolhido na determinação da solução.

3.2 Descrição da ferramenta utilizada: O Simulink

O Simulink é um software da MathWorks[®] e que funciona em conjunto com o Matlab[®]. Permite o estudo de sistemas dependentes do tempo, ou seja, sistemas dinâmicos. Usa um interface simples em que são usados blocos para representar expressões, *inputs*, *outputs*, operações matemáticas, etc. A Figura 40 é um exemplo de um ambiente gráfico:

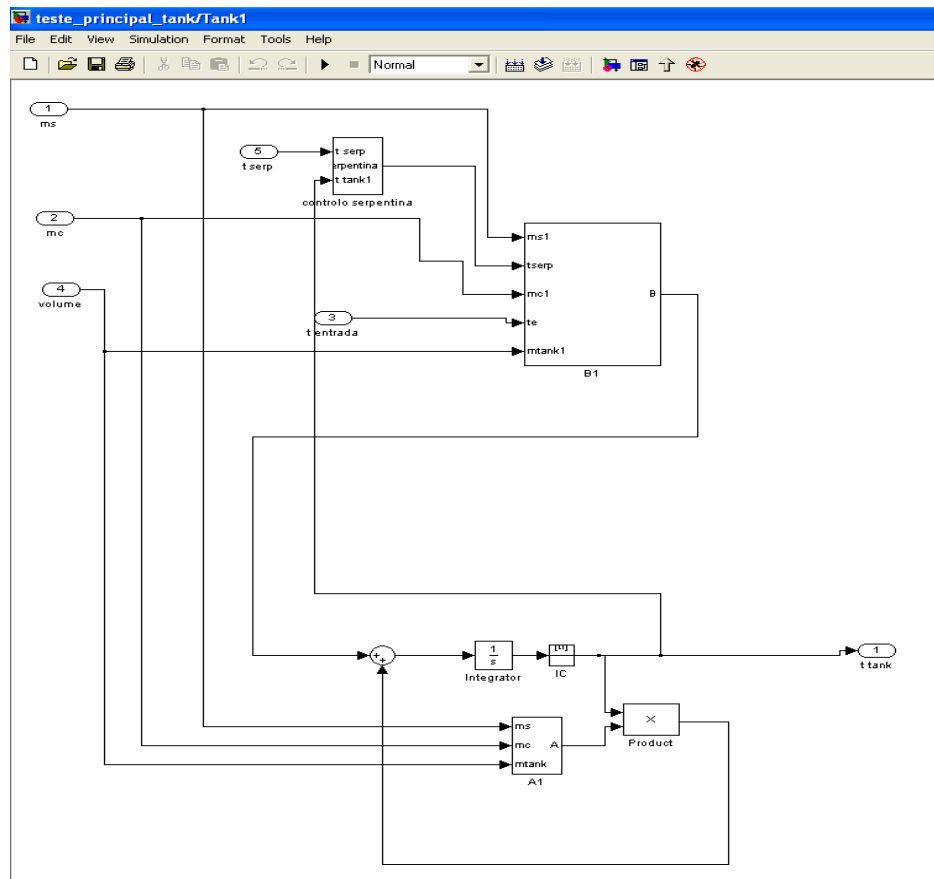


Figura 40 Exemplo de um sistema de blocos no Simulink

Dentro de cada bloco podem existir outros blocos e assim sucessivamente, de modo a que no limite, todo o sistema possa ser representado num pequeno quadrado que possui entradas e saídas. As vantagens deste software já foram enumeradas e salienta-se o facto de poder trabalhar com a variável “tempo”. Os softwares que existem para estes estudos energéticos, como o Retscreen®, Solterm®, Energy Plus®, entre outros, fazem uma análise estacionária e não levam em linha de conta os efeitos de realimentação. Por exemplo, a eficiência do colector solar diminui com o aumento da temperatura do fluído circulante que por sua vez depende da radiação. Como se vê, há aqui um *output*, que é a temperatura de saída do colector, que vai funcionar como um *input* para se calcular o rendimento do colector, que vai influenciar o valor da referida temperatura de saída. As maiores desvantagens encontradas prendem-se com a facilidade em cometer erros devido às inúmeras ligações que podem existir. Todos os blocos, sejam eles compostos ou singulares, possuem entradas e/ou saídas que são interligadas usando “fios”. Ora, se existirem vários blocos vão existir muitos fios, que dão origem a possíveis erros e troca de ligações

3.3 Implementação das equações constitutivas

Com este modo de funcionamento (blocos) conseguiram-se implementar as expressões apresentadas anteriormente, mas, ao invés de expandir e resolver o integral, usou-se o Simulink para realizar esta tarefa através do operador “integer”. As expressões do tanque (8) e do colector (9) foram divididas em blocos principais para tomar a forma apresentada em (7), como podemos observar:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T \left(-\dot{m}(t).cpf.\eta - \dot{m}c(t).cp - \frac{1}{Rt} \right)}{m.cp} + \frac{\dot{m}(t).cpf.\eta.Ti(t) + \dot{m}c(t).cp.Tr - \frac{Ta}{Rt}}{m.cp} \quad (8)$$

T- temperatura do tanque [°C]

Ti - temperatura de entrada do fluído circulante (dentro da serpentina) [°C]

cpf - calor especifico do fluído[kg/kJ/k]

cp - calor especifico da água [kg/kJ/K]

m - massa do tanque (kg)

Rt - resistência térmica total [°C/kW]

Ta - temperatura ambiente [°C]

\dot{m} -caudal de fluído circulante [kg/s]

$\dot{m}c$ - caudal de consumo [kg/s]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Ts.(-Fu.A - \dot{m}(t).cp)}{V\rho.cp} + \frac{Q(t).A.Fn + Fu.A.Ta + \dot{m}(t).cp.Ti(t)}{V\rho.cp} \quad (9)$$

V-volume de fluído dentro do colector (m^3)

Fu-coeficiente de perdas $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

Fn-rendimento óptico

A-área útil do colector (m^2)

Ti- temperatura de entrada no colector °C

Ts- temperatura de saída do colector °C

3.4 Descrição detalhada do sistema

Já foram apresentadas as equações que representam o tanque e o colector. Estas são implementadas no Simulink como se ilustra nas figuras Figura 41 e Figura 42.

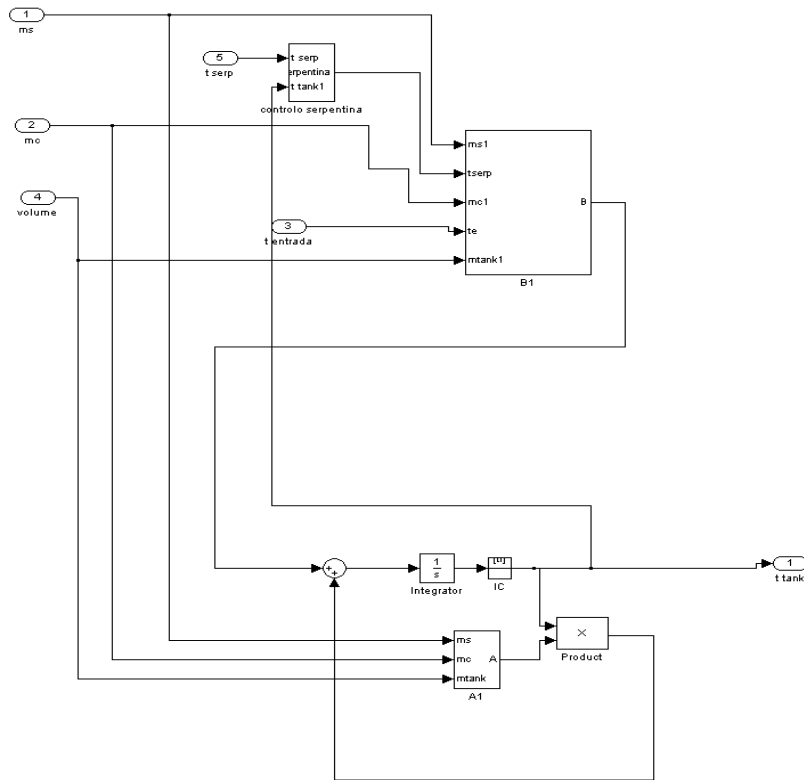


Figura 41 Esquema de blocos que traduz a expressão analítica do tanque

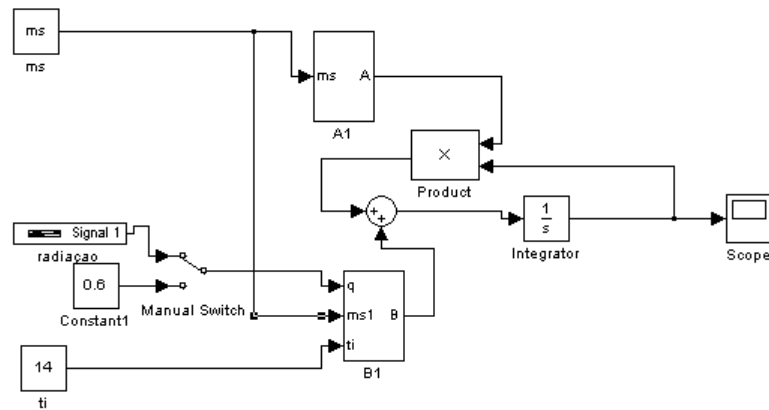


Figura 42 Esquema de blocos que traduz a expressão analítica do colector

Como já foi referido, cada bloco é constituído por outros blocos que por sua vez podem ser constituídos também por outros blocos.

Embora os elementos referidos (colector, tanque, serpentina) sejam os mais representativos e óbvios de um sistema colector solar, existem controlos adicionais que não podem ser desprezados e têm de ser levados em linha de conta quando se pretende simular o sistema e consequentemente, obter resultados realistas.

3.4.1 Controlo de caudal do primário

Este controlo permite regular o caudal do circuito primário. É implícito que o aumento deste valor beneficia a troca de calor da serpentina mas por outro lado prejudica a absorção de calor no colectador solar (ver os sinais associados a \dot{m} na expressão do tanque). Além do seu valor óptimo é também necessário desligar a bomba que o faz circular quando a temperatura do tanque é maior que a temperatura no circuito primário, ou seja, quando a serpentina arrefece o tanque em vez de o aquecer, o caudal do primário é desligado. Este raciocínio é representado na Figura 43.

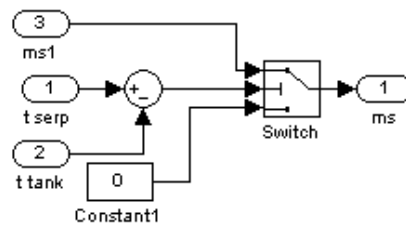


Figura 43 Esquema em Simulink do controlo do caudal do circuito primário

3.4.2 Serpentina

A equação da serpentina já foi descrita, e tal como os outros elementos, esta equação tem de ser traduzida na “linguagem Simulink” (Figura 44).

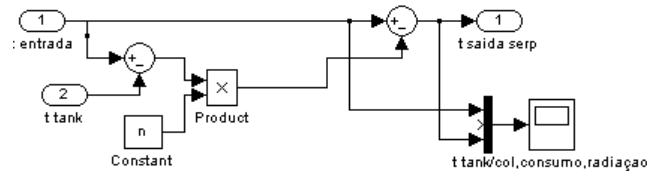


Figura 44 Esquema no Simulink da serpentina

Relembrando a equação da serpentina, $T_o = T_i - \eta \cdot (T_i - T)$, constatamos portanto que o valor T_o é necessário quando é usado mais que um tanque, pois o valor de saída da primeira serpentina é o valor de entrada da segunda como se exemplifica na Figura 45.

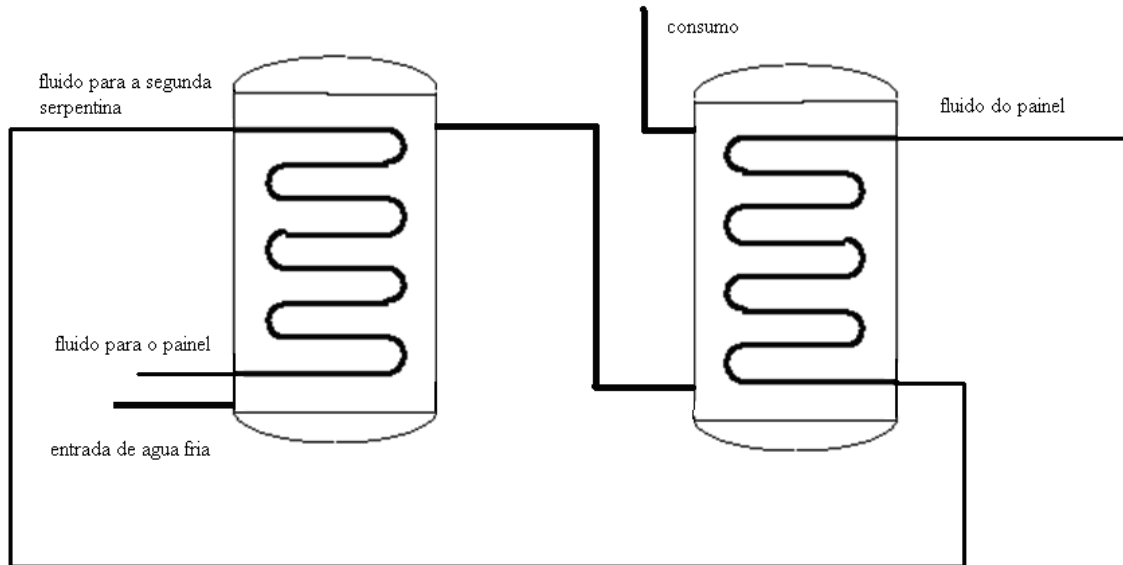


Figura 45 Esquema de ligações entre dois reservatórios

3.4.3 Controlo da temperatura do tanque

Este controlo prende-se com as limitações físicas dos reservatórios. Por norma, este pode atingir temperaturas elevadas, mas o limite físico dos materiais constituintes e o ponto de ebulição da água impõem limites. Levando em conta este problema, e com base no que os fabricantes oferecem, implementou-se um limite máximo de temperatura no tanque de 95°C, traduzido no sistema de blocos do Simulink da Figura 46. É bastante perceptível no Gráfico 11, o limite máximo de 95°C.

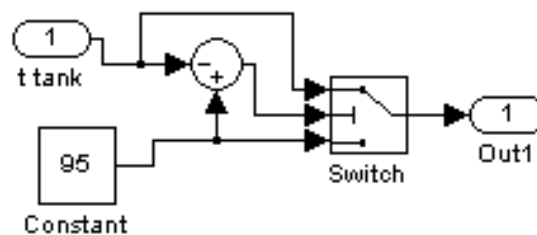


Figura 46 Diagrama de blocos do controlo da temperatura do tanque

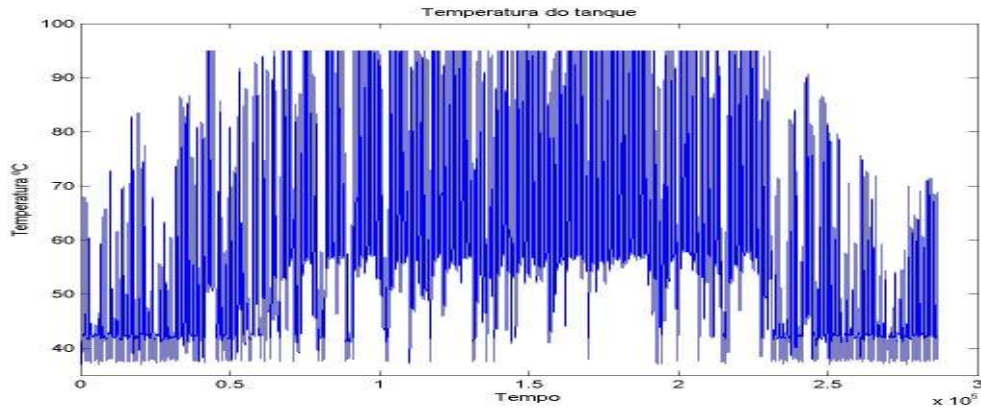


Gráfico 11 Efeito do controlo da temperatura do tanque

3.4.4 Consumo

O uso de águas quentes sanitárias tem como filosofia o uso de água quente para banhos, lavatórios, bidés, lava louças, etc. Ou seja, tal como num sistema convencional de caldeira por exemplo, é exigido um determinado caudal de água quente a uma determinada temperatura de conforto á saída de uma torneira. Estando o tanque a uma temperatura elevada, por exemplo 70°C, a temperatura da água á saída da torneira será a mesma (70°C), impedindo o uso de água directamente a esta temperatura para aplicações domésticas. Para contornar este problema, e porque seria também uma incoerência energética gastar água a 70°C quando apenas se pretendia, por exemplo, 45°C, implementa-se um controlo de caudal que usa como *input* a temperatura de conforto pretendida, a temperatura do tanque e a temperatura da água da rede.

$$\%_{hot} + (1 - \%)_{cold} = T_{conforto} \Leftrightarrow \% = \frac{T_c - T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}}$$

A equação supra descrita demonstra como se pode calcular a percentagem de água quente, presente no tanque, necessária para garantir uma temperatura de conforto na torneira (após ser misturada com a fracção correspondente de água fria da rede)

Á semelhança do que foi feito no Capítulo de validação, apresentam-se o Gráfico 12 e o Gráfico 13 numa escala mais expandida (1ano), que indicam a correcta aplicação da fórmula. Nos períodos de maior radiação (Verão), o consumo de água quente do tanque é menor pois este atinge maiores temperaturas.

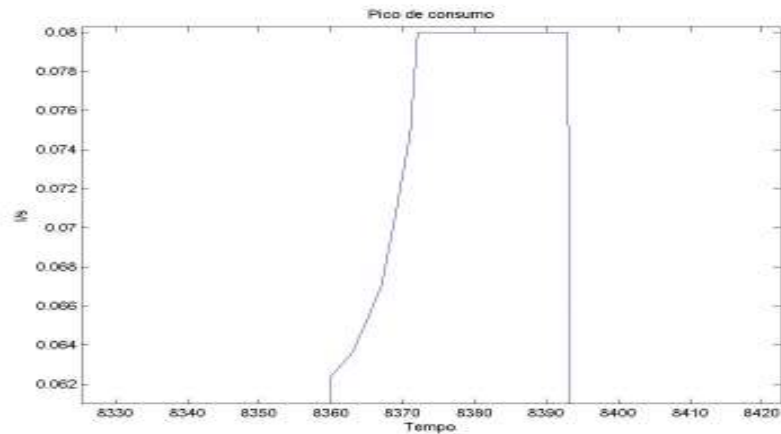


Gráfico 12 Pico de consumo

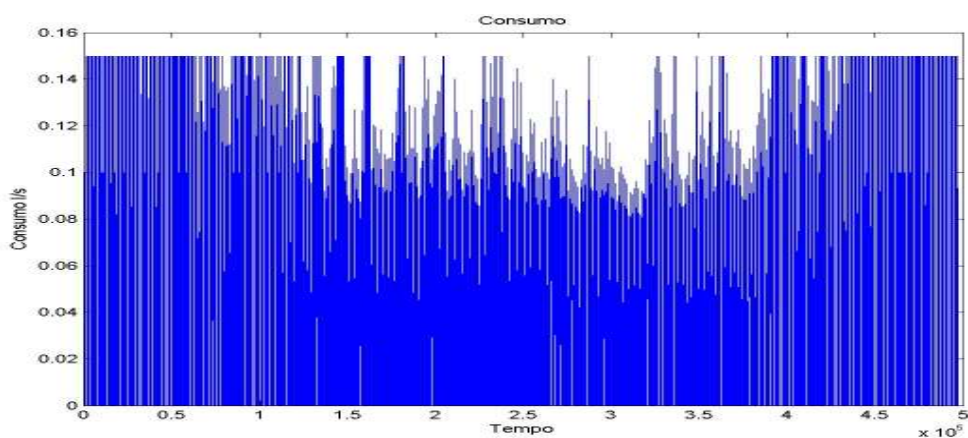


Gráfico 13 Efeito do controlo de caudal de consumo

3.4.5 Resistência auxiliar

Uma das desvantagens de um sistema solar térmico é a sua sazonalidade. É um sistema que funciona bem no Verão e com maiores limitações no Inverno, quando o desejado seria contrario. Quando as necessidades de água quente são maiores (inverno), é quando se conseguem menores valores de temperatura devido aos menores valores de radiação. Este problema sugere a incapacidade do sistema satisfazer as necessidades de água quente em determinados períodos. Esta incapacidade é superada usando um sistema auxiliar para aquecer água. O sistema escolhido é uma resistência eléctrica, já que é a maneira mais simples e imediata de transferir calor, e devido á simplicidade de construção é facilmente incorporada num tanque de armazenamento. Esta resistência vai funcionar sempre que a temperatura desça de um determinado valor.

Ao implementar este componente no Simulink foi detectado um obstáculo que não era obvio quando se formulou o problema. Na verdade, quando se afirma que a resistência liga quando a temperatura desce de um determinado valor cometemos uma incoerência que se vai traduzir num comportamento errático deste componente. Quando a temperatura desce determinado valor, liga-se a resistência, o que implica

consequentemente uma subida da temperatura, desligando novamente a resistência. Isto provoca uma série de pulsos, como se vê na Figura 47 com elevada frequência em que a resistência é ligada e desligada consecutivamente. Isto gera um sobrecarregamento na simulação e não representa a realidade.

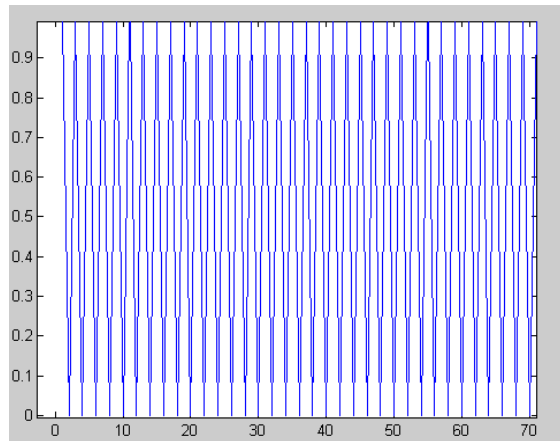


Figura 47 Comportamento (on-off sem controlo) da resistência auxiliar

A solução para este problema passa por atribuir um intervalo à temperatura de conforto. Quando a temperatura do tanque descer $T_c - x$, a resistência liga até que a temperatura volta a ser $T_c + x$. Este algoritmo é implementado num bloco chamado “resistência” e que é ilustrado na Figura 48:

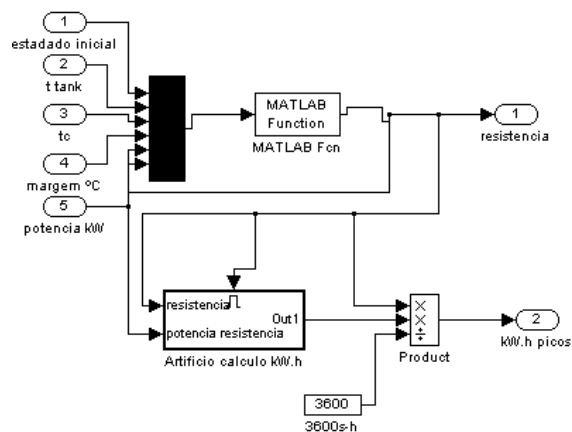


Figura 48 Solução para evitar a elevada frequência de pulsos da resistência auxiliar

Dele fazem parte uma função proveniente do Matlab® e um outro algoritmo que calcula os kWh usados.

A função do Matlab® denominada “booleana” permite atribuir o intervalo de temperaturas em que a resistência opera. O código é usado é o seguinte:

```
function [serp,var]=boleana(s1,t,tc,margem,potencia,var)

if var==false;
    if t<(tc-margem);
        s1=potencia;
        var=true;
    end
elseif t<(tc+margem);
    s1=potencia;
else var=false;
end
```

O outro bloco, denominado “artifício de cálculo” permite multiplicar o valor da resistência (kW) pelo tempo que está ligada. Para isso foi necessário encontrar o valor desse tempo. Cada vez que a resistência era ligada teria de haver um “set” de um cronómetro e cada vez que seria desligada teria de haver um “reset”. Este raciocínio implementou-se da seguinte maneira (Figura 49)

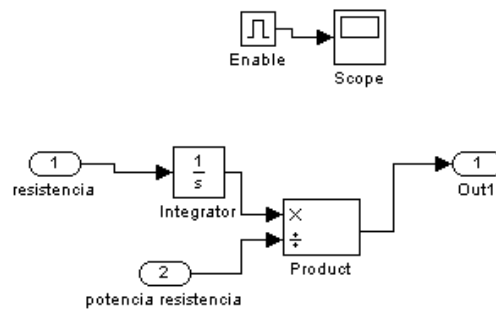


Figura 49 Algoritmo usado para cálculo de kWh gastos na resistência auxiliar

Quando a resistência é activada, o valor desta (constante) é integrado, produzindo uma recta. Ao dividir essa recta pelo próprio valor da resistência, a recta toma a forma $y=x$, que pode representar um relógio. Quando se multiplica o valor da resistência por essa recta obtém-se uma outra recta onde o último valor representa os kWh gastos nesse período. A figura Figura 50 representa esta explicação.

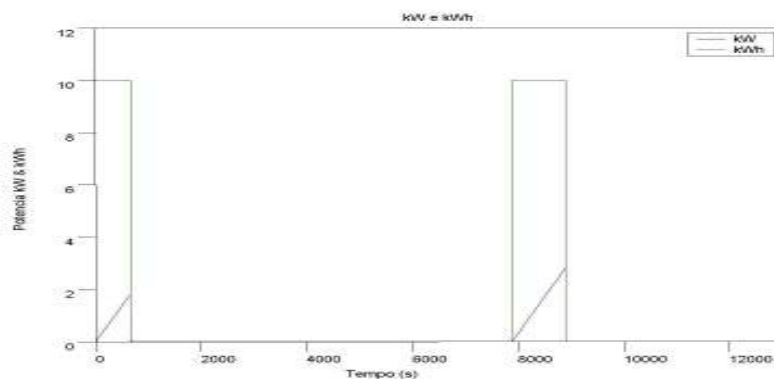


Figura 50 Observação de kWh e kW

Ao obter estes últimos valores, representados na última figura é aplicado um novo algoritmo que permite somar todos os picos, que darão o valor final de kWh totais gastos. Esse algoritmo é o seguinte:

```
function [valor]=kW(kWpico,i)
for n=1:1:length(kWpico)-1;
if kWpico(n+1)<kWpico(n);
    i=i+kWpico(n);
end
end
```

Por fim, conseguem-se obter os kWh gastos e será este valor que se pretende otimizar. Um sistema alicerçado em energias renováveis só faz sentido quando o uso de energia fósseis é minimizado ou mesmo anulado.

3.5 Resumo do Capítulo 3

As equações constitutivas do sistema foram trabalhadas de forma a serem implementadas no Simulink organizadamente. Através dos seus blocos e funções associadas, o software é capaz de resolver essas equações dinamicamente. Por outro lado, um sistema real, além dos componentes óbvios, como sejam os colectores, tanques, permutadores, possui também válvulas e controlos que asseguram o bom funcionamento e aproveitamento do sistema. Esses controlos não foram analisados analiticamente, foram implementados de uma forma directa no programa. Nomeiam-se o controlo do caudal primário, serpentina, consumo e resistência auxiliar.

CAPÍTULO 4: ANÁLISE TRANSITÓRIA DO SISTEMA USANDO O SIMULINK: INFLUÊNCIA DOS VÁRIOS PARÂMETROS

4.1 Introdução

O sistema colector solar térmico é composto por muitas variáveis, passíveis de serem alteradas e optimizadas. Seria muito difícil, num estudo desta dimensão, analisar cada uma em pormenor e as suas inúmeras relações, o que se fará é analisar cada uma individualmente e ver qual a sua contribuição para o resultado final. Este capítulo é alicerçado num estudo qualitativo uma vez que não se pode concluir nem generalizar uma conclusão para todos os casos de estudo. No entanto é possível ficar com uma ideia de como o resultado final é afectado pelos vários componentes.

4.2 Optimização do sistema, efeito de cada componente individual

Como foi mencionado anteriormente, um sistema colector solar é composto por vários componentes. Estes podem ser interligados de diferentes maneiras. O Simulink® ajuda-nos a perceber quais as melhores.

4.2.1 Colector solar

Os colectores solares, associados a uma imagem recorrente de uma fila de colectores interligados, podem na verdade estar ligados em série ou em paralelo. Esta ligação caracteriza o modo como a alimentação do colector é efectuada. As Figura 51 e Figura 52 explicam as diferenças

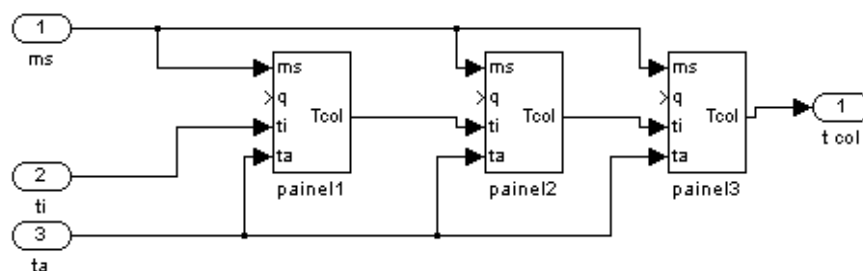


Figura 51 Colectores ligados em série

Nesta figura podemos verificar que o caudal de saída de um colector é o caudal de entrada de outro e assim sucessivamente. A temperatura a que o fluido sai do colector 1 é igual á temperatura de entrada do colector 2 e por sua vez a temperatura de saída do colector 2 é igual á temperatura de entrada do colector 3.

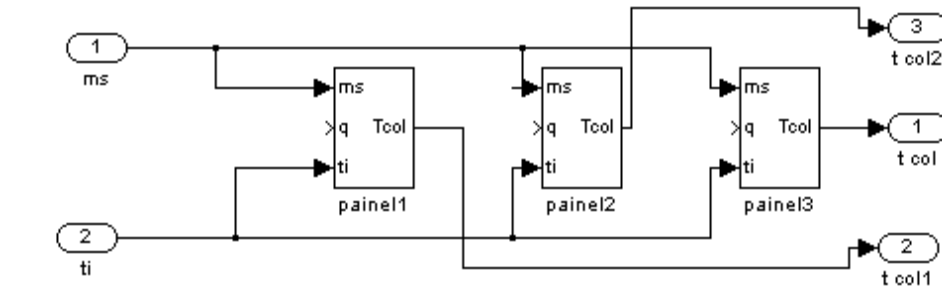


Figura 52 Colectores ligados em paralelo

Por outro lado, neste sistema ligado em paralelo podemos observar que o caudal de entrada e consequente temperatura do fluido é igual em todos os colectores.

A diferença entre os dois sistemas reside no valor do caudal do fluido circulante. Esse valor é inferior no sistema em paralelo tantas vezes quanto o número de colectores. Ou seja, por exemplo, um sistema de 4 colectores em série tem caudal de 0.01kg/s , o sistema paralelo equivalente, com o mesmo número e características de colectores, terá 0.0025kg/s em cada colector. Será fácil perceber que um caudal menor significa um maior tempo disponível para absorver calor. No entanto, é implícito que o gradiente de temperatura que o fluido sofre é também maior. Qual será o melhor sistema? Depende do número de colectores. Existe um parâmetro fundamental que permite responder a esta pergunta: o rendimento dos colectores.

4.2.1.1 Série vs Paralelo

$$\eta = Fn - Fu \times \frac{\Delta T}{Q}$$

Esta é a equação já apresentada anteriormente e que representa o rendimento do colector. Seguindo o raciocínio, constata-se que quando maior a diferença de temperatura entre o fluido e a temperatura ambiente, menor o rendimento do colector. Por outras palavras, um colector onde circule fluido a uma elevada temperatura (mais elevada que a temperatura ambiente) terá um rendimento menor que um colector onde a temperatura seja menor. O Gráfico 14 demonstra o comportamento de um sistema série versus um sistema paralelo, com todos os parâmetros constantes (caudal consumo, caudal fluido operante, radiação, temperatura ambiente)

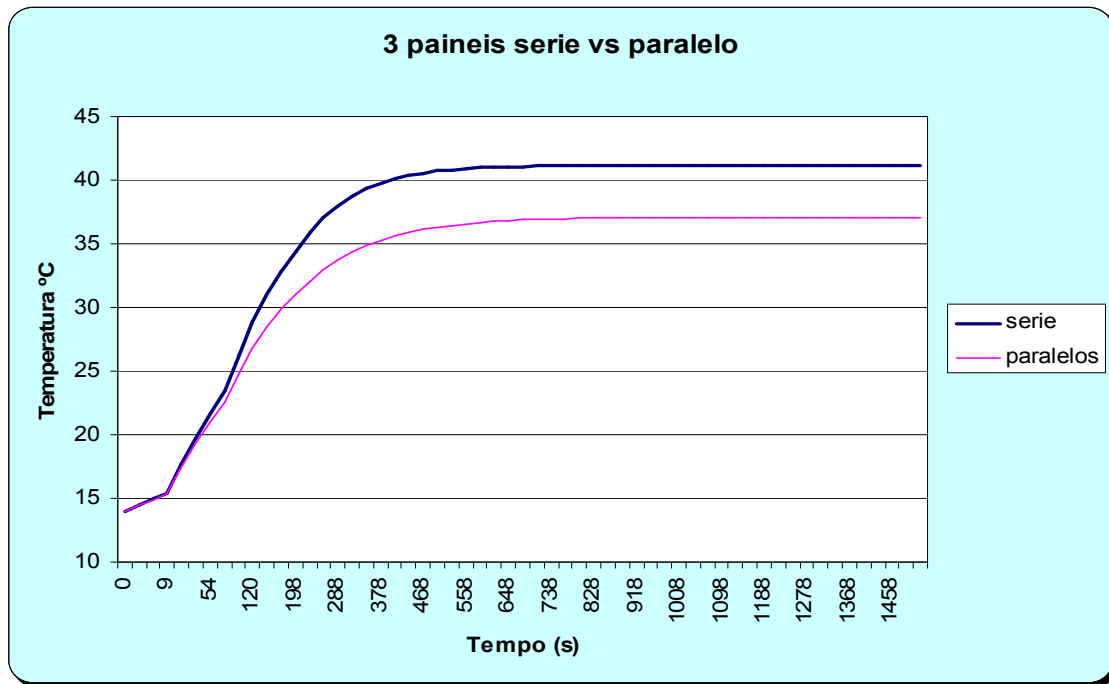


Gráfico 14 Temperaturas atingidas com 3 colectores ligados em série e 3 em paralelo (consumo constante e com parâmetros fixos)

Podemos então concluir que o sistema em série aparenta ser mais eficaz, atingindo uma maior temperatura de estagnação.

4.2.1.2 Treze Colectores em série

Questiona-se no entanto, até que ponto será o sistema em série, superior. Os testes demonstrados no Gráfico 15 foram efectuados nas mesmas condições mas com 13 colectores em série:

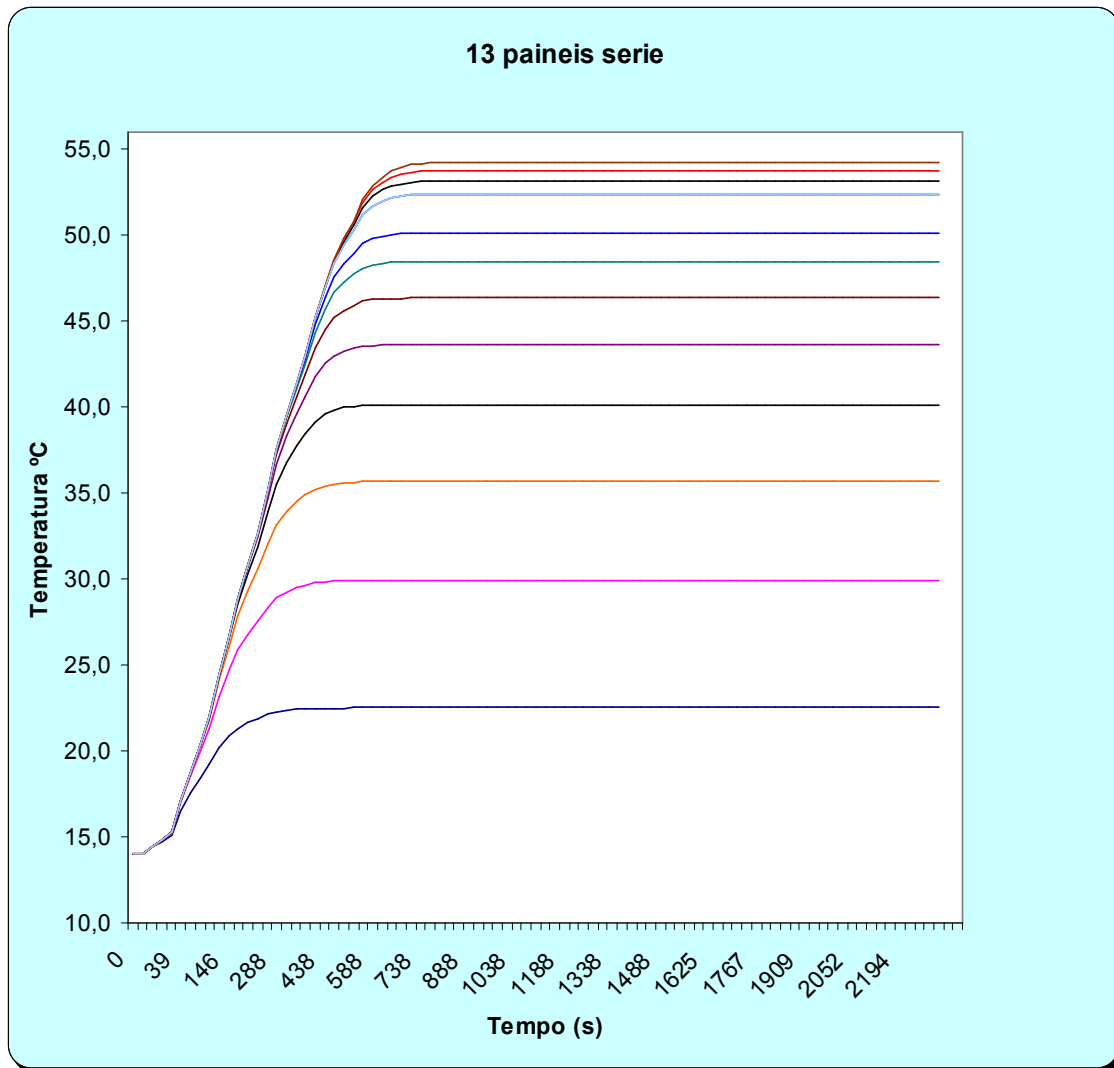


Gráfico 15 Temperaturas atingidas pelos diferentes 13 colectores quando ligados em série

É notória a menor contribuição dos últimos colectores para o sistema. O aumento de temperatura é tímido dado que a temperatura do fluído é elevada e portanto os colectores perdem eficiência, segundo a fórmula já apresentada.

4.2.1.3 Perda de eficiência

Analisando o valor final de temperatura de cada colector estabelece-se uma relação entre a contribuição de cada colector, como demonstra o Gráfico 16:

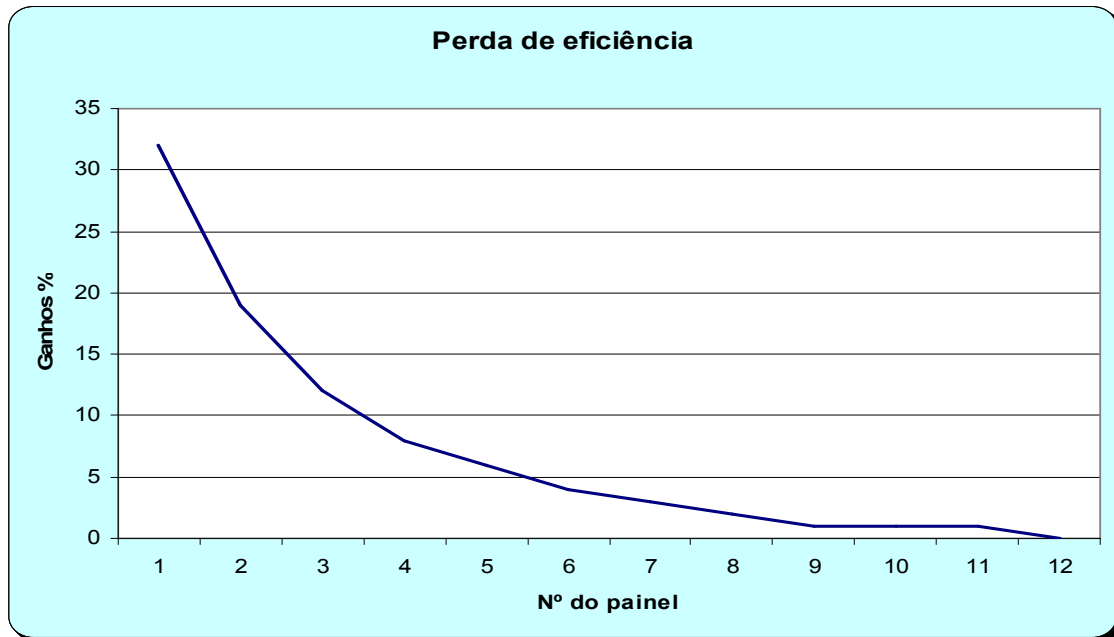


Gráfico 16 Eficiência dos colectores em função do número de colectores

A perda de eficiência tem um comportamento exponencial. Mesmo variando os parâmetros de entrada (radiação, caudal), o comportamento mostrou ser semelhante. Este problema não se coloca no caso de um sistema em paralelo pois a temperatura de entrada é igual em todos os colectores.

4.2.1.4 Treze colectores em série vs 13 colectores em paralelo

Compara-se então, no Gráfico 17 as temperaturas de saída da bateria de colectores em série e em paralelo.

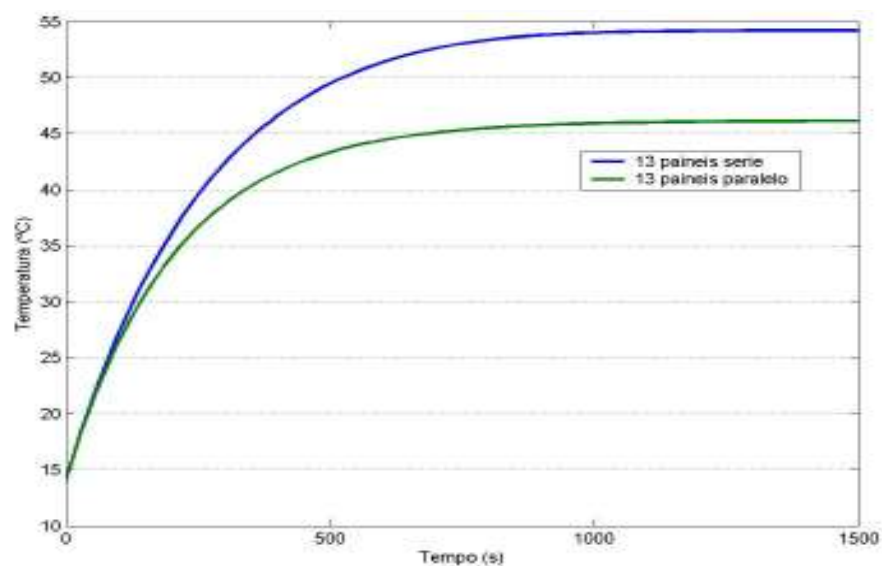


Gráfico 17 Temperaturas atingidas por 13 colectores em série e em paralelo

Como se verifica, os colectores ligados em série conseguem uma maior temperatura de saída. Conclui-se portanto que os colectores em série atingem maiores temperaturas, mas é preponderante saber até que ponto esse aumento justifica a adição de mais colectores. Não se pode estabelecer um número fixo dado que os parâmetros de entrada, nomeadamente, o caudal do circuito, influenciam enormemente esse valor; por outro lado, é um facto a perda de eficácia individual dos colectores aumentar com o número dos mesmos.

4.2.1.5 Várias Configurações

Apresenta-se no Gráfico 18, a título de curiosidade, gráficos com varias configurações e colectores que para os mesmos parâmetros de entrada, atingem diferentes temperaturas.

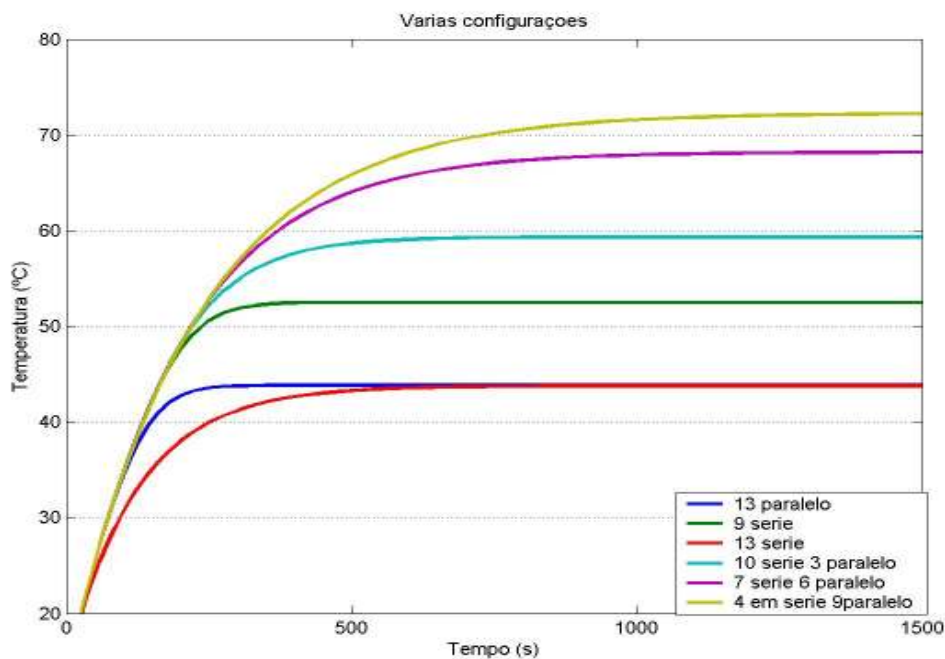


Gráfico 18 Temperaturas atingidas por diferentes ligações dos colectores com caudal do primário elevado (0.08 kg/s)

Neste exemplo específico o caudal do circuito é de 0.08kg/s (bastante elevado) e podemos constatar que a melhor solução passa por conjugar um sistema em série com um em paralelo. No entanto se diminuirmos o caudal para 0.02kg/s (valor comum) o comportamento é o seguinte:

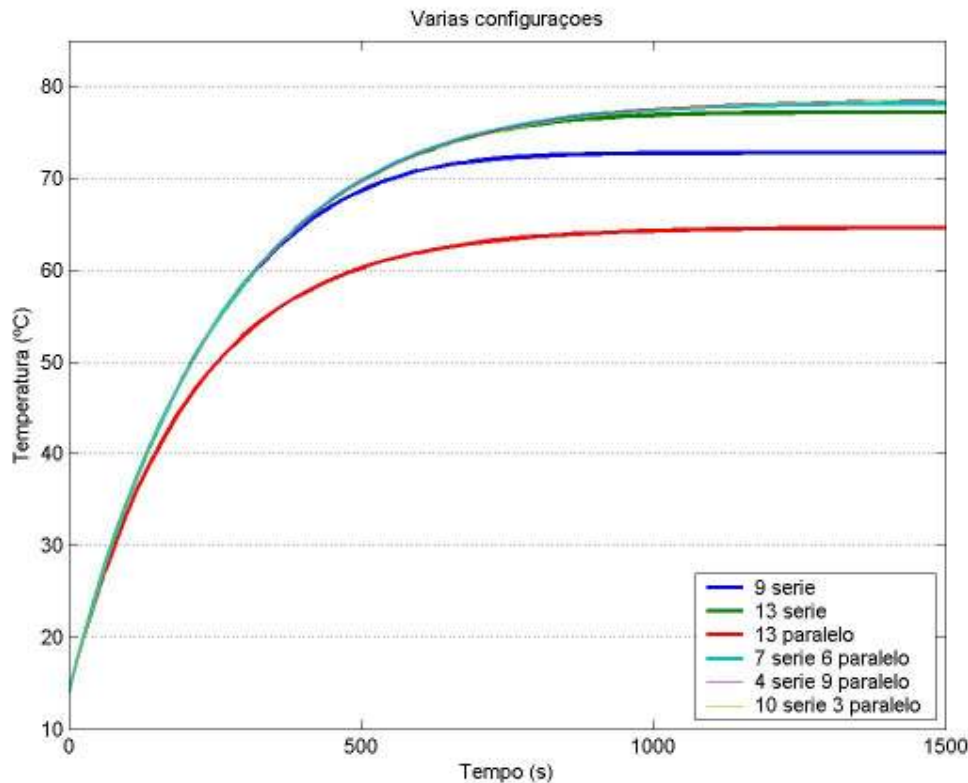


Gráfico 19 Temperaturas atingidas por diferentes ligações dos colectores, com caudal do primário baixo (0.02 kg/s)

Como se verifica, os valores foram bastantes alterados, mas continua a ser a melhor opção (no que respeita á temperatura), ter um sistema misto. O que atinge maior temperatura são 10 colectores em série e 3 em paralelo. Os treze colectores em paralelo continuam a ser os que apresentam piores resultados.

Em jeito de resumo podemos enumerar algumas conclusões, importantes no estudo deste elemento, o colector solar. Os colectores quando ligados em série apresentam melhores resultados que os mesmos colectores ligados em paralelo. Por outro lado, esta conclusão não é tão linear como aparenta pois, como se viu, os colectores em série implicam uma diminuição na eficácia dos mesmos á medida que a temperatura do fluido que circula no seu interior aumenta. Mediante o tipo de aplicação, uma boa solução passa por instalar um sistema misto, com colectores em série e em paralelo. Sublinhar também um parâmetro que não foi incluído no estudo, que são as perdas de bombagem. Estas perdas são maiores numa instalação em série pois resulta da soma de todas as perdas individuais em cada colector. No caso dos colectores em paralelo esta perda é a mesma em cada colector. Embora a potência dedicada á bombagem seja relativamente pequena, é um aspecto a levar em conta e que potencia mais uma vez a instalação mista. Conclui-se também que o caudal do circuito primário condiciona a temperatura alcançada, sendo um caudal mais elevado prejudicial a esta temperatura, enquanto que um baixo caudal permite maiores valores. No entanto a análise ainda esta restrita aos colectores, quando forem analisados os tanques esta contribuição do caudal é contrária.

4.2.2 Tanques de Armazenamento

O tanque de armazenamento permite conservar a energia absorvida pela água, para ser utilizada em períodos em que essa energia fornecida é mais baixa. Funciona como uma bateria. Os tanques, á semelhança do que acontece nos colectores, admitem vários tipos de ligação entre eles. A tecnologia neste campo está muito avançada existindo tanques estratificados, com varias serpentinas, com isolamentos inovadores, que tornam o armazenamento mais eficiente. Neste trabalho analisam-se tanques na sua forma mais simples, com uma serpentina e um determinado isolamento. Como já se referiu anteriormente, procura-se ser o mais realista possível e o poder económico da actualidade e a pouca predisposição do utilizador adquirir um tanque com tecnologia de ponta, apontam para que o uso desta tecnologia seja ainda tímida.

Podem ser usados vários tanques ou um tanque apenas. De uma forma geral, quanto maior o tanque maior a sua inércia térmica, ou seja, mais tempo demora a aquecer e a arrefecer. Relativamente ás entradas e saídas de água de consumo, existe uma técnica denominada contra corrente, em que o sentido de alimentação de água fria da rede é contrária ao sentido do caudal do circuito primário. A Figura 53 Esquema de ligação série contra corrente ilustra esta explicação.

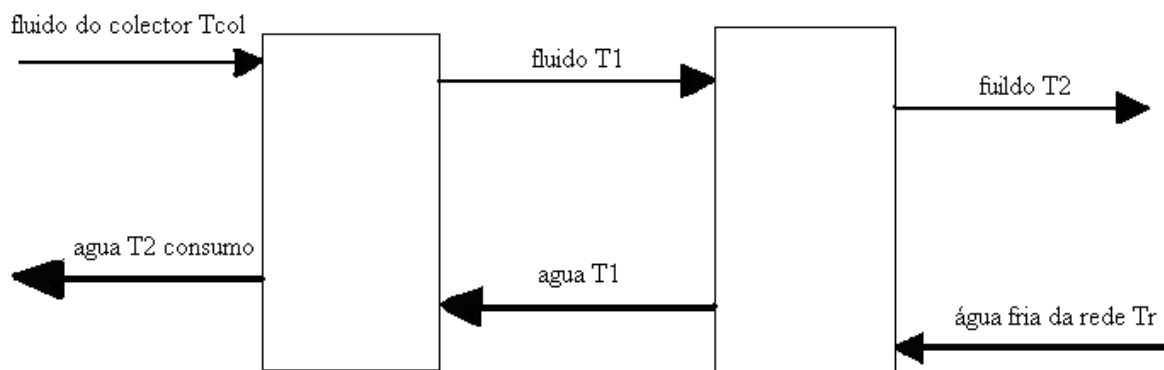


Figura 53 Esquema de ligação série contra corrente

4.2.2.1 Dois Tanques em série contra corrente, em série normal, e em paralelo

Os teste seguintes procuram identificar qual a melhor configuração aparente, no que respeita ás ligações do tanques. O Gráfico 20 mostra o comportamento dos tanques mediante várias configurações, para os mesmos parâmetros de entrada, para um determinado consumo, e um volume total igual nas três configurações (200L)

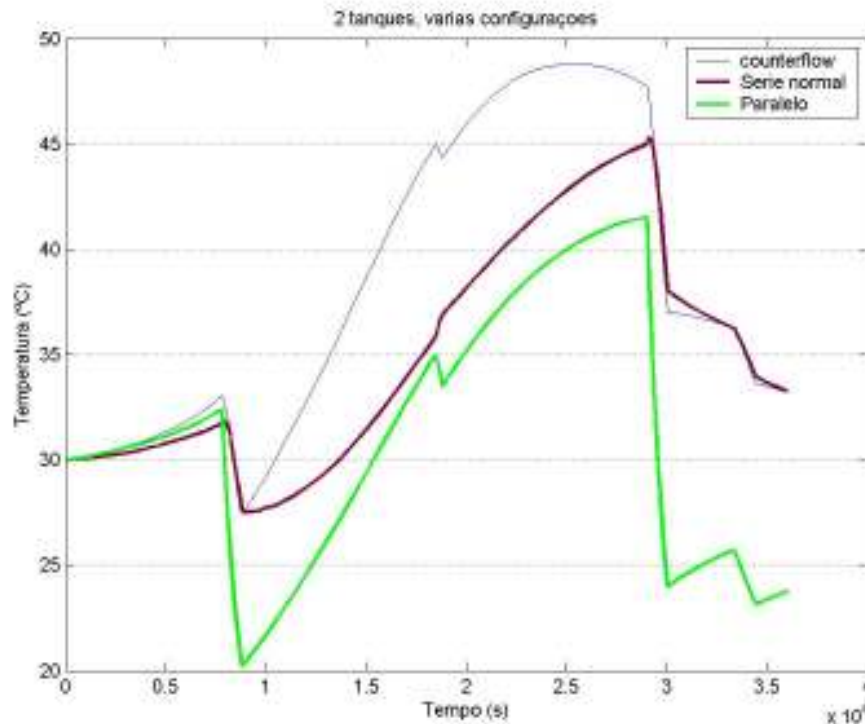


Gráfico 20 Temperaturas atingidas nos tanques com mesmo volume total mas diferentes ligações

As temperaturas apresentadas correspondem ao tanque de consumo, aquele que vai fornecer água ao utilizador. O par de tanques ligado em série contra corrente (counterflow) demonstra ser o que apresenta melhores resultados. Os tanques em paralelo são aparentemente os piores.

4.2.2.2 Influência dos volumes e número de tanques

Os volumes que os tanques possuem são um factor activo no valor final da temperatura. Devido às inércias térmicas, já referidas, é preferencial ter um tanque pequeno em certos casos e noutros é favorável ter tanques grandes. Testam-se então as diferenças na contribuição dos volumes, mantendo todos os outros parâmetros constantes. Os testes realizados são para um sistema com 3 colectores em série, 2 tanques em série contra corrente e com um volume total de 200L (configuração características para uma habitação de 4 pessoas). O sistema é complementado com todos os controlos mencionados; controlo de caudal, resistência auxiliar, serpentina, controlo do caudal primário.

Para volumes de 100L em cada tanque, o Gráfico 21 ilustra as temperaturas atingidas:

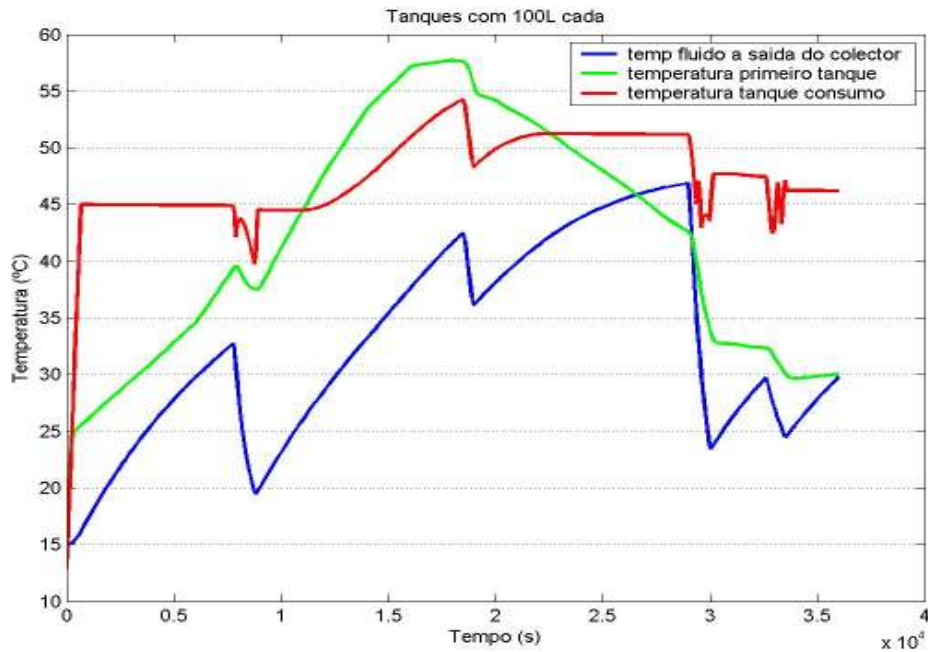


Gráfico 21 Temperaturas atingidas com tanques de 100L cada, ligados em série contra corrente

É notória a inclusão da resistência auxiliar. Para uma temperatura de conforto de 43°C e uma margem de 3°C existem períodos de “ruído” correspondentes ao on/off da resistência potenciado por um consumo nesse momento. A resistência é apenas aplicada ao tanque de consumo, pois não faria sentido aquecer os dois tanques já que apenas um fornece água directamente ao consumidor. Com o algoritmo de medição de kWh o valor medido foi de 7.33 kWh.

Variamos agora os volumes parciais com o primeiro tanque de 50L e o tanque de consumo com 150L, os resultados apresentam-se no Gráfico 22.

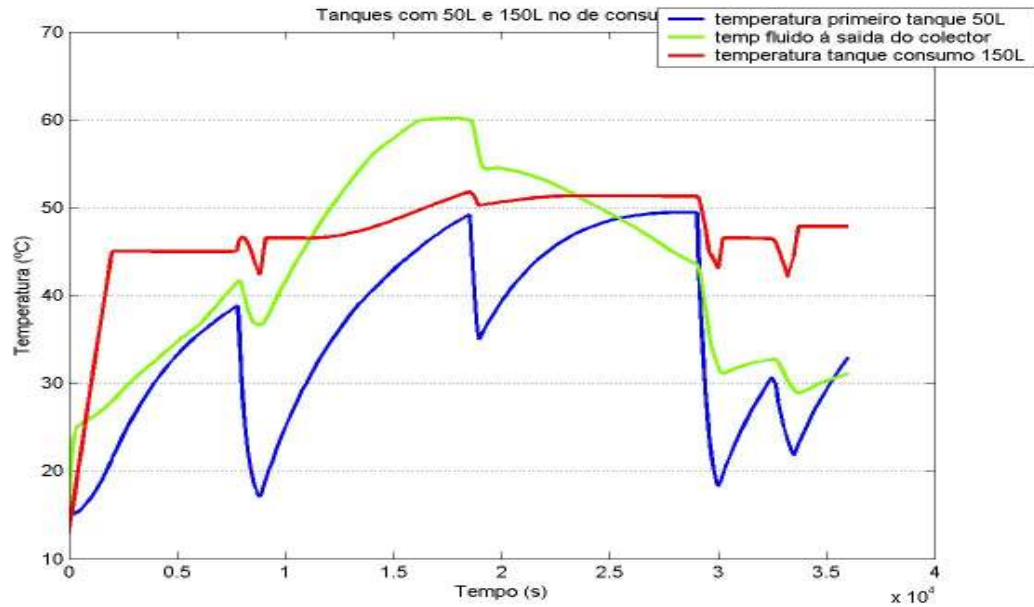


Gráfico 22 Temperaturas atingidas com tanques 50L e apoio e 150L no tanque de consumo, ligados em série contra corrente

Podemos ver a maior aproximação dos valores dos dois tanques. O valor medido de kWh foi de 12.5 kWh. Muito superior ao primeiro. Por fim analisamos o sistema com o tanque de consumo com 50L e o primeiro tanque com 150L.

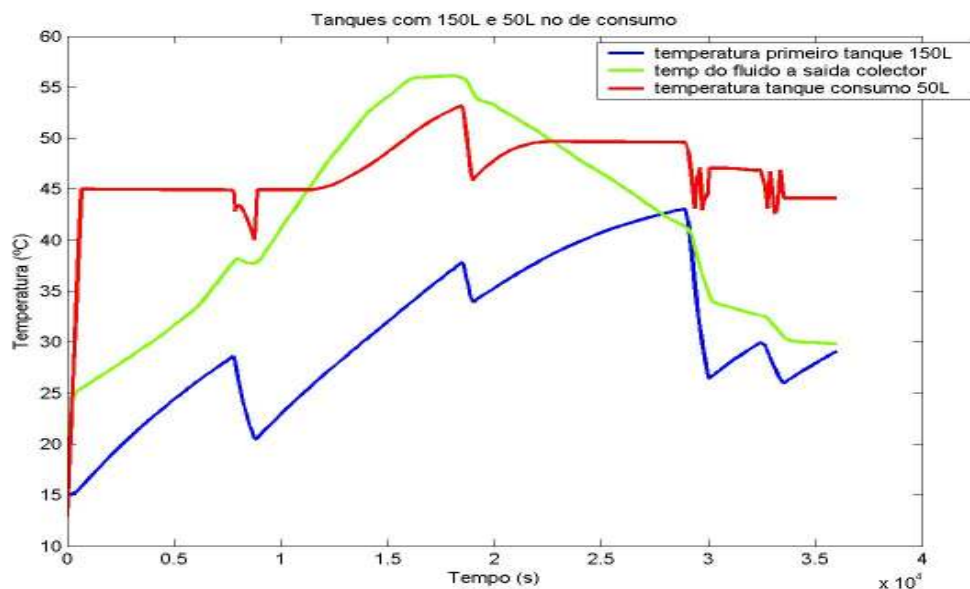


Gráfico 23 Temperaturas atingidas com tanques 150L de apoio e 50L no tanque de consumo, ligados em série contra corrente

Nesta configuração o valor medido foi de 7.17 kWh, ligeiramente inferior ao primeiro caso. Percebe-se então que, mediante o perfil de consumo, o volume dos tanques pode ser atribuído de maneira a otimizar o sistema.

Interessa também verificar qual o efeito de ter mais tanques. Os testes subsequentes procuram responder a esta questão (Tabela 2 e Tabela 3). Para uma mesma exigência ao nível do consumo e com iguais parâmetros de entrada, analisa-se o menor valor de kWh atingidos com dois tanques e com quatro tanques, ligados em série contra corrente.

Tanques (consumo e 1apoio) L	Potencia kWh
20 100	4.17
20 110	4.98
25 100	5.13
25 150	5.18
20 90	5.2
25 80	5.36
25 90	5.4
30 90	5.64
40 100	5.84
50 150	6.08

Tabela 2 Varias combinações de volumes (2 tanques) e respectivos gastos na resistência auxiliar

Parece existir um padrão quanto aos volumes do tanque. Os pares que apresentam melhores valores são aqueles em que o tanque de consumo tem uma baixa capacidade. Conclui-se também que o tanque de apoio deve ser maior que o primeiro tanque, embora não exista uma tendência para o melhor valor ser um extremo, ou seja, o melhor valor atingido foi com um tanque de apoio de 100L, no entanto, valor superiores e inferiores produziram piores resultados, o que demonstra que é preponderante analisar os dois tanques e não tirar apenas conclusões individuais.

No caso de usar quatro tanques os resultados foram preferíveis, como podemos constatar na Tabela 3:

Tanques L (consumo e 3 apoios)	Potencia kWh
25 60 50 70	3.68
20 40 50 70	
20 50 50 50	
25 40 50 70	
25 60 50 40	4.2
25 40 50 30	

Tabela 3 Varias combinações de volumes (4 tanques) e respectivos gastos na resistência auxiliar

À semelhança do primeiro caso, cumpre-se a tendência de melhores resultados associados a um volume do tanque de consumo baixo. Verifica-se também que quando os tanques têm um volume crescente no sentido da circulação do fluído solar, os resultados são aparentemente melhores, o que não é de toda uma regra, dado que o melhor resultado não cumpre esta configuração, apesar disso a tendência geral é essa.

A conclusão principal que se tira destes testes é que não podemos generalizar nem produzir nenhum tipo de parâmetro que avalie a eficácia do sistema com base no número de tanques e os seus volumes. Cada caso é um caso e deve ser analisado separadamente. Não será, no entanto, uma incoerência afirmar as conclusões apresentadas previamente: o tanque de consumo deve ser pequeno e os de apoio devem ser maiores.

4.2.2.3 Caudal do circuito primário

O caudal do circuito primário é a taxa á qual o liquido dentro da serpentina circula. Nos colectores, o valor deste deve ser baixo de modo a ter tempo para aquecer. Nos tanques o raciocínio é contrário, o caudal deve ser elevado de modo a promover a maior troca de calor possível com o tanque. Os testes levados a cabo têm como base um sistema de dois tanques ligados em série contra corrente, com parâmetros de entrada fixos, para um dia e diferentes valores de caudal. Os valores obtidos foram os apresentados no Gráfico 24:

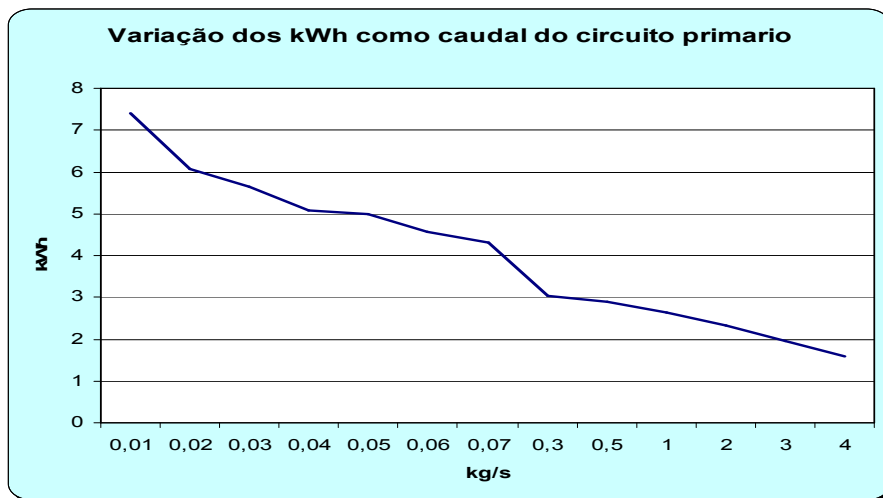


Gráfico 24 Variação dos kWh gastos, com o caudal do circuito primário.

Se construirmos um gráfico interpolando valores, o resultado é o seguinte:

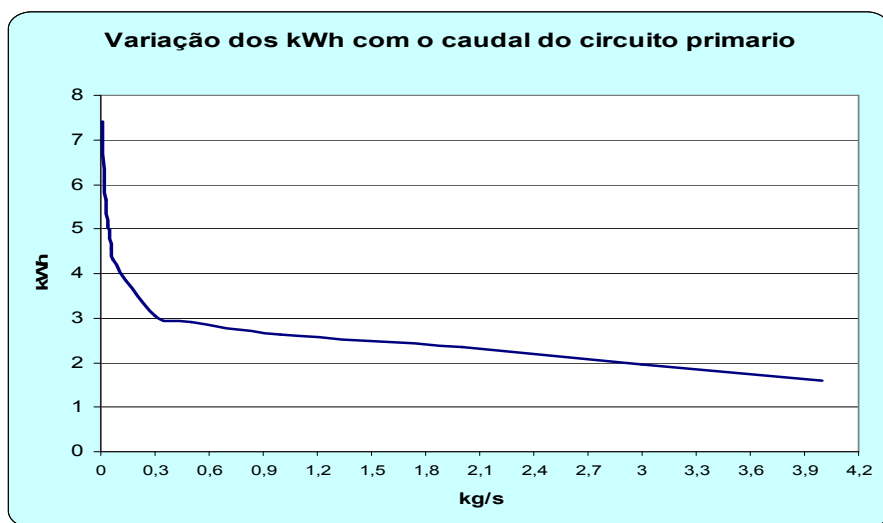


Gráfico 25 Variação dos kWh gastos com o caudal do circuito primário (valores interpolados)

É notória uma tendência assintótica. A partir de 0.3kg/s os ganhos começam a ser cada vez mais pequenos. Sendo este um sistema de circulação forçada é necessária uma bomba que faça circular o fluído e consequentemente existe um gasto com essa bomba, gasto esse que é de extrema importância pois pode assumir valores muito elevados invalidando todo o propósito da instalação. Não sendo esta uma análise económica, percebe-se que a partir dos 0.3kg/s os ganhos parecem não compensar elevado aumento de caudal. Importa sublinhar novamente que esta análise é para um sistema específico e esta conclusão pode mudar noutros sistemas, no entanto a relação caudal-potência da resistência manter-se-á, restando definir o valor considerado equilibrado.

4.3 Resumo do capítulo 4

Foram neste capítulo analisados individualmente os colectores solares, tanques, e caudais do circuito primário. De uma maneira particular, analisaram-se as alterações provocadas pela alteração de cada componente. Verificou-se que o número de colectores influencia o rendimento dos mesmos, sendo que uma ligação em série promove um decréscimo de rendimento com o aumento de colectores. Adoptou-se um também um sistema misto com colectores em série e em paralelo e conclui-se que para um sistema que requer muitos colectores, esta será a opção mais vantajosa. Foi feito o mesmo tipo de análise para os tanques e estudaram-se ligações em série, paralelo e série contra corrente. Registaram-se melhores resultados nesta última. Por fim examinou-se o valor de caudal do circuito primário. Conclui-se que a partir de um certo aumento de caudal, os ganhos deixam de ser significativos, não justificando o uso de uma bomba mais potente. Existe um valor que melhora a prestação do sistema, sendo que esse valor varia conforme o caso de estudo em questão.

CAPÍTULO 5: COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE AS FERRAMENTAS RETSCREEN, SOLTERM E TRANSOL

5.1 Introdução

Sendo o Retscreen® um software implementado no mercado e o Solterm® um software usado também por imperativos legais, é interessante realizar um ensaio e comparar os diferentes resultados entre eles. É também produtivo, comparar os resultados do modelo Transol usando os mesmos parâmetros.

Para que exista um elemento comum nas simulações é necessário definir um *output* igual em todos os modelos para que nos possamos referenciar por ele. Neste trabalho esse elemento é o valor de energia auxiliar usada (kWh). Será também esse valor que se tentará otimizar. Outros parâmetros poderiam ser focados, como por exemplo: número de colectores, volume de tanque, inclinação, azimuth, entre outros. Mas por ser um elemento que traduz um gasto monetário adicional, e pelas razões já mencionadas relativas ao interesse de um utilizador com propósitos familiares, optou-se por analisar este parâmetro.

5.2 Ferramentas de análise do tipo estacionário

5.2.1 O módulo do Retscreen®

O Retscreen® é um software de disponibilização gratuita. Foi desenvolvido no Canada em parcerias com Governo, Industria e Universidades. É simples de usar e trabalha com macros que são acedidos através do Excel, ou seja, em todos os casos, é um programa em Excel. Além de fazer todos os cálculos e relações entre os vários *inputs*, possui úteis bancos de dados climáticos de variadas localizações e de fornecedores de componentes. Permite fazer estudos energéticos e estudos económicos, o que o torna numa ferramenta bastante completa já que o estudo económico pode ser tão ou mais importante que o estudo energético. O aspecto gráfico deste software está ilustrado na Figura 54.

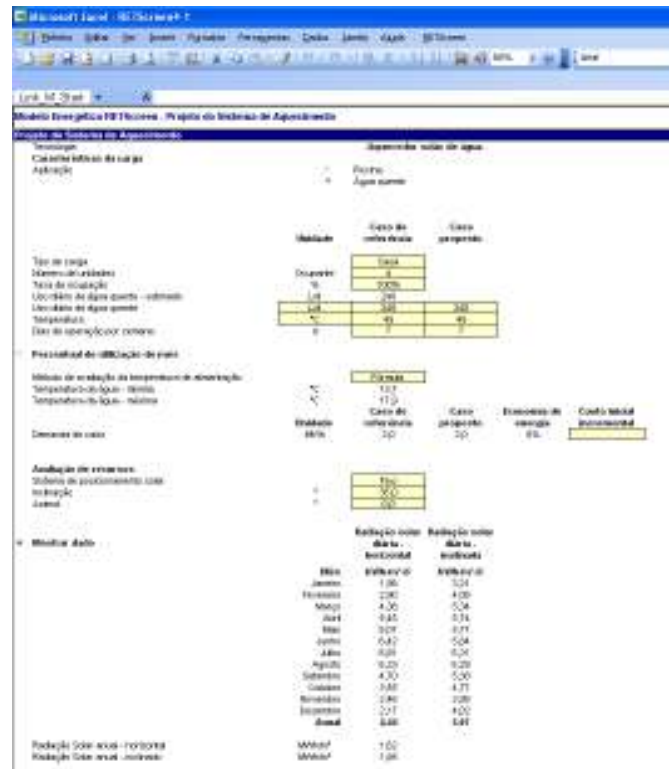


Figura 54 Aspecto gráfico do Retscreen®

No presente trabalho, a parte económica não foi considerada visto ser um estudo energético e não económico. O programa divide a análise em duas etapas: primeiramente uma fase inicial em que definem a localização, tipo de projecto, tipo de análise, e onde se podem ver os dados climáticos da localização escolhida. Estes dados são valores médios mensais. Na segunda parte, definem-se todos os parâmetros inerentes ao sistema; número de colectores, tanques, volumes, características do colector e dos tanques, eficiências, rendimentos, tipo de sistema auxiliar e combustível., etc. Tendo todos os aspectos definidos o programa devolve alguns resultados sendo os mais importantes o que dizem respeito á energia de apoio gasta. É este o principal valor de comparação entre os dois estudos.

5.2.2 O módulo Solterm[®]

O Solterm® é um programa de análise de desempenho e pré-dimensionamento de sistemas solares especialmente ajustado às condições climáticas e técnicas de Portugal, que tem vindo a ser desenvolvido pelo INETI (Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação) há alguns anos. Este programa tem tido várias versões e a versão 4 foi mesmo adoptada como padrão de cálculo pelo sistema de incentivos governamental à energia solar térmica designado por Iniciativa Pública “Água Quente Solar para Portugal”. É também o software escolhido no RCCTE, para efeitos de projecto.

O seu interface tem o seguinte aspecto (Figura 55). Este software é mais versátil que o Retscreen®. Permite elaborar um perfil de consumo sem que este seja predefinido ou imposto. Possui a capacidade de otimizar o sistema fixando as variáveis que pretendemos, o que representa uma significativa vantagem em relação a outros softwares. O restante funcionamento é bastante intuitivo e semelhante ao Retscreen®.

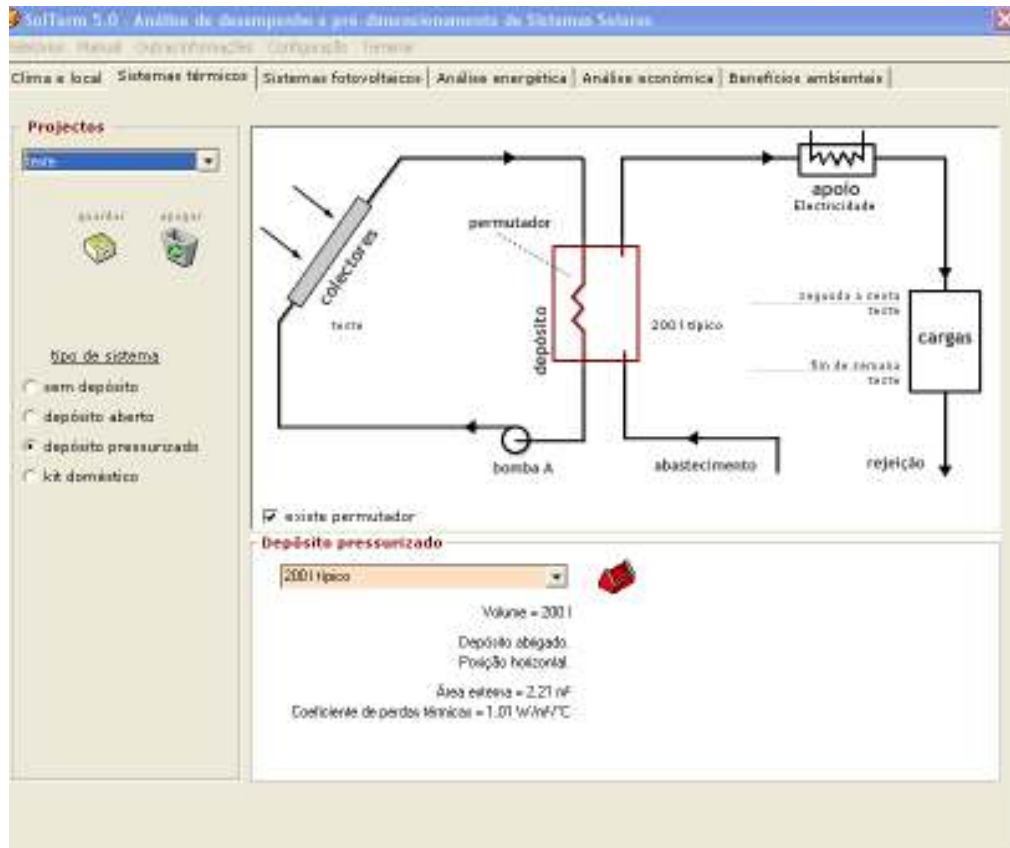


Figura 55 Aspecto gráfico do Solterm®

5.3 Caso de estudo

5.3.1 Definição das principais variáveis

As variáveis inerentes a um sistema deste género são inúmeras. A lista gerada pelas mesmas seria bastante extensa, será então mais indicado enumerar as mais relevantes e as que mais interesse despertam ao utilizador.

I. Dados exteriores

- Radiação horizontal e difusa – O Solterm fornece os dados de radiação directa horizontal e difusa. Com a expressão já explanada consegue-se obter o valor de um plano inclinado e com determinado azimuth.
- Temperatura de água de rede – A temperatura da água pode também ser encontrada nas bases de dados do Retscreen®, sendo que são assumidos

apenas dois valores: máximo e mínimo. Na análise efectuado com o Simulink considera-se o valor médio.

- c. Consumo – O consumo é calculado com base no valor referência de 40L por pessoa diários.
- d. Latitude do local – Caracteriza o local do estudo
- e. Temperatura ambiente – Este factor varia ao longo do ano. Nos softwares estacionários, as bases de dados possuem estes valores.
- f. Valor de temperatura de conforto – É a temperatura passível de ser usada confortavelmente sem que o usuário sinta frio ou calor.

II. Dados do colector

- a. Área – a área de cada colector está definida segundo o valor padrão de $1m^2$ por habitante. Este valor é o mínimo exigido pelo RCCTE, no entanto, é o valor que será usado na análise visto que o acrescento de colectores irá elevar o custo do projecto. Visto estarmos a centrar o estudo num cenário familiar, o factor investimento é primordial. Mesmo que possa vir a ser amortizado a longo prazo, o utilizador age racionalmente a curto prazo.
- b. Rendimento óptico – Designado por F_n , é um parâmetro adimensional
- c. Coeficiente de perdas – Designado por F_u , expresso em $\frac{kW}{m^2 K}$.
- d. Caudal do circuito primário – Caudal do fluído que circula na serpentina e colectores. No Solterm este valor é passível de ser alterado, mas não no Retscreen®.
- e. Fluído operante
- f. Inclinação do colector – De inicio toma o valor de 35°
- g. Azimute do colector – De inicio toma o valor zero.

III. Dados do tanque

- a. Volume – É um parâmetro modificável em qualquer um dos softwares. O volume influencia grandemente a performance do sistema.
- b. Resistência térmica total – Nos outros softwares este parâmetro é representado por um valor percentual que quantifica o nível de perdas. No Simulink, já explicado atrás, é calculada uma resistência térmica que representa essas mesmas perdas.
- c. Serpentina – Embora não seja um elemento constitutivo do tanque, a serpentina está normalmente instala no mesmo, a menos que seja um permutador exterior. Essa serpentina é afectada de um rendimento, que pode ser estimado percentualmente (caso verificado em todas as analises).

IV. Resistência

- a. Este componente é caracterizado associando-lhe uma potencia e uma margem (ver explicação no Capítulo 4), para evitar o funcionamento ON/OFF com frequência elevada. Este componente é alterável no presente trabalho mas não nos outros dois softwares.

Resumindo os principais parâmetros de entrada, obtemos então um caso de estudo para uma família de 4 pessoas com um consumo de água quente típico (40L a 60°C) com 2 banho de manhã e á noite e algum consumo á hora de almoço para lavagem de louça e outros. Trata-se de um sistema de circulação forçada com armazenamento de 60l por pessoa e 1m² de colector por pessoa, sendo que o volume de armazenamento é um parâmetro passível de ser modificado, mas usando inicialmente um valor de 60L por pessoa, enquanto que a área de colector é um valor fixo, visto que num sistema real é mais fácil e económico alterar o armazenamento do que acrescentar colectores. Visto ser imposto por lei um valor de 1m² por pessoa, é com esse valor que se trabalha pois representa o pior dos cenários; o acrescento de área irá sempre melhorar o resultado.

5.4 Análise do caso de estudo usando os Softwares

5.4.1 Análise do caso de estudo usando o modulo do Retscreen[®]

Esta etapa consiste em fazer uma análise no Retscreen[®] do caso e estudo. Posteriormente fazer-se-á a mesma analise mas usando os dados climáticos do Solterm. Por fim usar-se-á o Transol.

O caso de estudo é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

Local. Coimbra – latitude 40,2°

Consumo: totais 288L (72L por pessoa), 40°C, 4 pessoas

Colector: inclinação=35°, azimuth=0°, rendimento óptico $F_n=0.74$, coeficiente de perdas $F_u=4.28 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$, $A=2.06\text{m}^2$, 2 colectores, 5% de perdas em cada colector.

Tanque: 200L, 5% de perdas

Rendimento da serpentina: 75%

Resultado: a demanda de calor necessário traduz-se em 3MWh e o sistema produz 2.0MWh, como podemos verificar na Figura 56, perfazendo 66% das necessidades, sendo que **1000kWh** são fornecidos pelo sistema auxiliar.

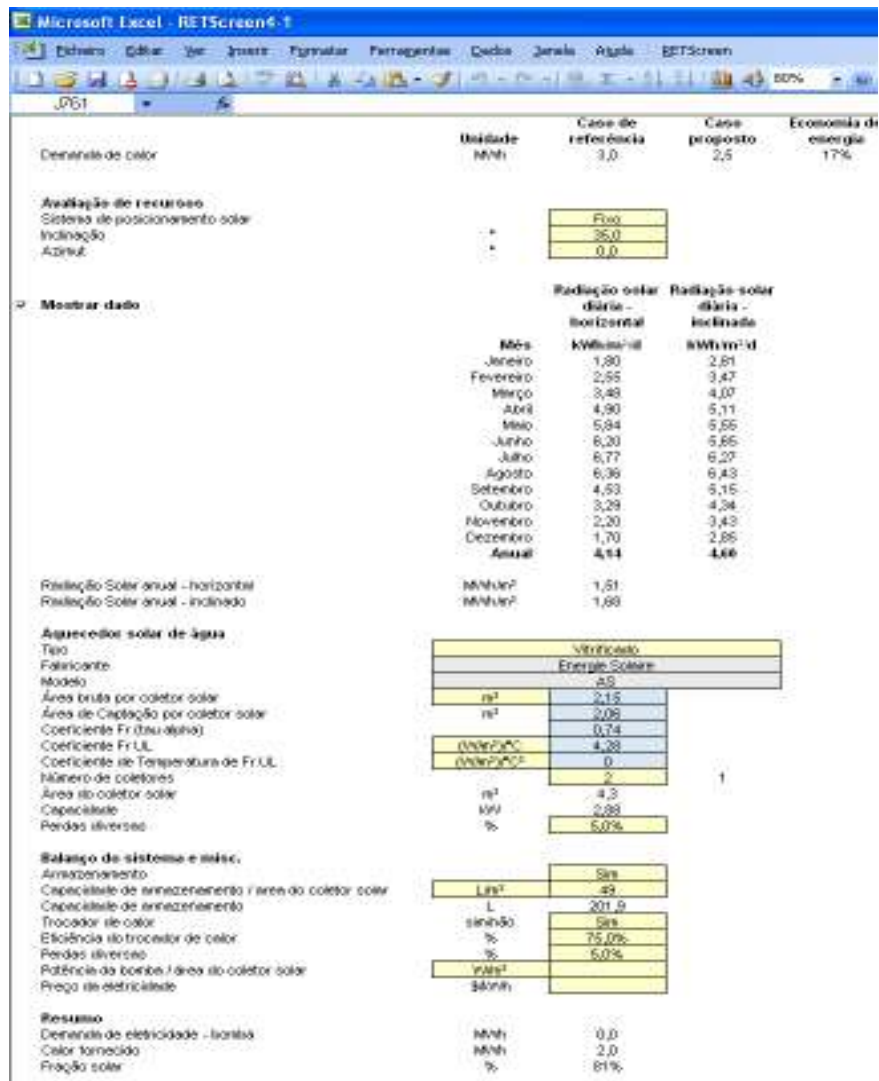


Figura 56 Resultados do Retscreen®

5.4.2 Análise do caso de estudo usando o modulo do Retscreen® com dados climáticos do Solterm®

Para que a análise seja mais equiparada, são usados os valores climáticos do banco de dados do Solterm no Retscreen®. Passamos então á definição do caso de estudo. Tal como no Solterm® e mesmo no simulador desenvolvido no presente trabalho, são necessários vários parâmetros de entrada que devem ser definidos pelo utilizador.

Local. Coimbra – latitude 40,2°

Consumo: totais 288L (72L diários por pessoa), 40°C, 4 pessoas

Colector: inclinação=35°, azimuth=0°, rendimento óptico $F_n=0.74$, coeficiente de perdas $F_u=4.28 \text{ W/m}^2/\text{°C}$, $A=2.06 \text{ m}^2$, 2 colectores, 5% de perdas em cada colector.

Tanque: 200L, 5% de perdas

Rendimento da serpentina: 75%

Resultado: a demanda de calor necessário são 3MWh e o sistema produz 2.1MWh, perfazendo 70% das necessidades, sendo que **900kWh** são fornecidos pelo sistema auxiliar, como podemos verificar na Figura 57.

Microsoft Excel - RETScreen4-1				
Ficheiro Editar Ver Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda RETScreen				
D778				80%
Temperatura da água - máxima	°C	17,9		
		Caso de referência	Caso proposto	Economia de energia
		3,0	2,5	17%
Demanda de calor	Unidade MWh			
Avaliação de recursos				
Sistema de posicionamento solar		Fixo		
Inclinação	°	35,0		
Azimet	°	0,0		
<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar dado				
		Radiação solar diária - horizontal	Radiação solar diária - inclinada	
		kWh/m²/d	kWh/m²/d	
Mês				
Janeiro		1,80	2,81	
Fevereiro		2,55	3,47	
Março		3,48	4,07	
Abril		4,90	5,11	
Maio		5,84	5,55	
Junho		6,20	5,65	
Julho		6,77	6,27	
Agosto		6,36	6,43	
Setembro		4,53	5,15	
Outubro		3,29	4,34	
Novembro		2,20	3,43	
Dezembro		1,70	2,85	
Anual		4,14	4,60	
Radiação Solar anual - horizontal	MWh/m²	1,51		
Radiação Solar anual - inclinado	MWh/m²	1,68		
Aquecedor solar de água				
Tipo		Vitrificado		
Fabricante		Agema SA. energies		
Modelo		Azur 6		
Área bruta por coletor solar	m²	2,26		
Área de Captação por coletor solar	m²	2,06		
Coefficiente Fr (tau alpha)		0,74		
Coefficiente Fr UL	(W/m²)°C	4,28		
Coefficiente de Temperatura de Fr UL	(W/m²)°C²	0		
Número de coletores		2	1	
Área do coletor solar	m²	4,52		
Capacidade	kV	2,88		
Perdas diversas	%	5,0%		
Balanco do sistema e misc.				
Armazenamento		Sim		
Capacidade de armazenamento / area do coletor solar	L/m²	54		
Capacidade de armazenamento	L	222,5		
Trocador de calor	simulhao	Sim		
Efficiencia do trocador de calor	%	75,0%		
Perdas diversas	%	5,0%		
Potência da bomba / área do coletor solar	W/m²			
Preço da eletricidade	\$/kVh			
Resumo				
Demanda de eletricidade - bomba	MWh	0,0		
Calor fornecido	MWh	2,1		
Fração solar	%	83%		
Iniciiar Modelo Energético Análise de Custos Análise de Emissões Análise Financeira Análi				
Pronto				
Iniciiar retscreen hot water ... Gestor de tarefas do ... Retscree				

Figura 57 Resultado final no Retscreen® usando dados climáticos do Solterm

Como podemos constatar e confirmando o que foi afirmado previamente, o software não permite escolher quais os tipos de ligações que existem entre colectores e tanques. Não permite refinar o perfil de consumo ou de radiação, ao invés, admite que o consumo é efectuado na totalidade ao fim do dia. Usa médias mensais e não abrange inércias térmicas dos elementos, entre outras limitações. De salientar que estes parâmetros de entrada serão iguais no Solterm® e no simulador desenvolvido sempre que assim o for possível.

5.4.3 Análise do caso de estudo usando o modulo do Solterm® com consumo semelhante ao Retscreen®

Usando o Solterm e os parâmetros de entrada descrito acima, é possível fazer uma análise semelhante á do Retscreen®. Para que os colectores tenham as mesmas características foi criado um colector “custom”, que possui as mesmas características em todos os softwares. O resultado obtido está apresentado na Figura 58.



Figura 58 Resultado final do Solterm®

A energia fornecida pelo sistema é 2599kWh, sendo que 3092kWh é a carga exigida e o sistema auxiliar fornece **493kWh**. Assim sendo existe uma capacidade de 84% do sistema, contra os 70% calculados pelo Retscreen®.

5.4.4 Análise do caso de estudo usando o Solterm com consumo fraccionado

Usando agora valores e períodos de consumo mais realistas procedemos á analise recorrendo novamente ao Solterm. Os resultados obtidos são semelhantes ao teste anterior. Energia fornecida de 2571kWh, energia requisitada 3092kWh, energia

auxiliar consumida **521kWh**, perfazendo uma contribuição de 83.2%. Como se verifica o resultado é semelhante ao anterior, com um consumo total ao fim do dia.



Figura 59 Resultados do Solterm

5.4.5 Análise do caso de estudo usando o modelo transitório desenvolvido.

Por fim, leva-se a cabo a análise no Transol. A versatilidade deste modelo permite usar mais variáveis que não foram consideradas nos outros casos. Mantêm-se no entanto, os parâmetros de entradas similares, sempre que possível, nomeadamente o consumo total do fim do dia.

O valor de energia auxiliar consumida é de **708kWh**. Apresenta-se na Figura 60 os valores da temperatura do tanque, consumo, radiação e comportamento da resistência (on/off). O eixo das abcissas é o tempo, sendo que o início representa o dia 1 de Janeiro e o fim o dia 31 de Dezembro. Se observarmos o Gráfico 28 e Gráfico 29 que ilustram a temperatura do tanque, resistência auxiliar e radiação, podemos analisar, em 6 dias o comportamento do sistema. É possível reparar que a temperatura do tanque aumenta quando não há consumo e há radiação, e que quando há um consumo (que adicionalmente coincide com o fim da radiação disponível) a temperatura do tanque

desce rapidamente activando a resistência auxiliar. Também se notam as perdas térmicas do tanque durante a noite.

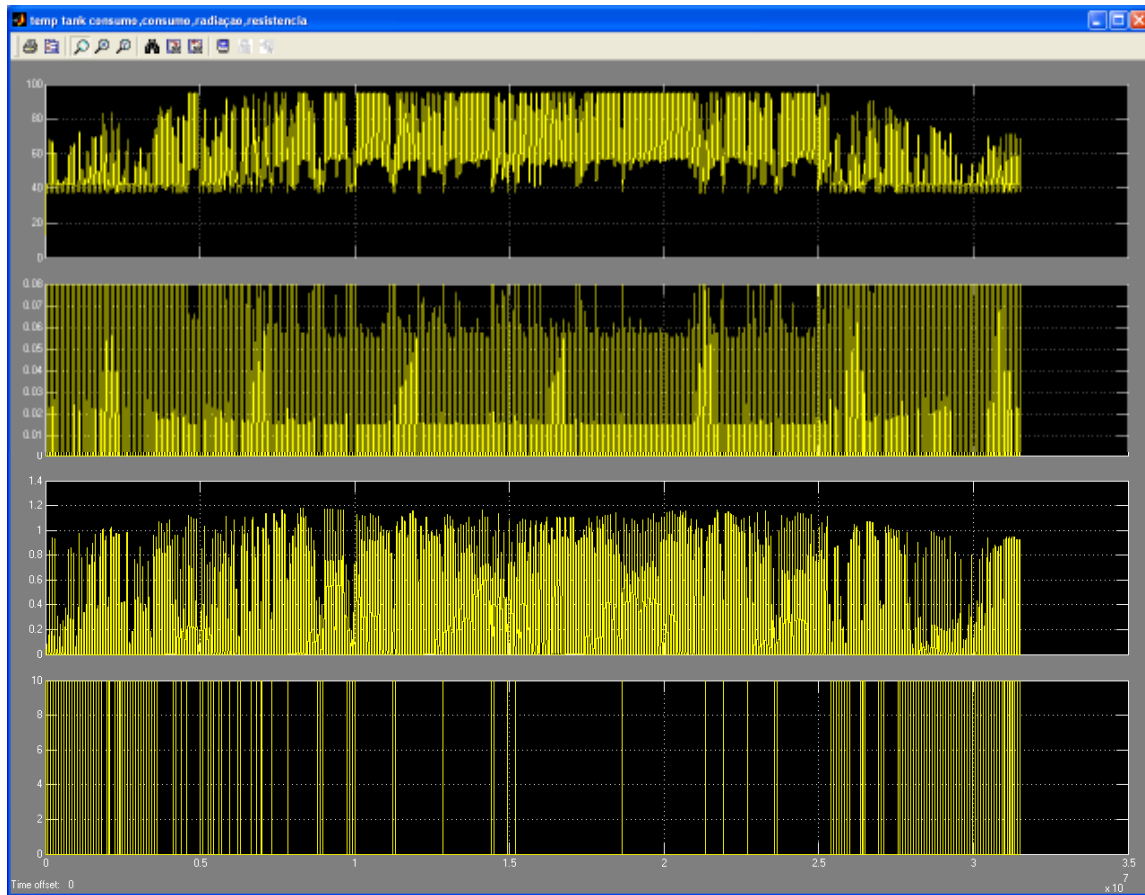


Figura 60 Resultados gráficos do Transol (temperatura do tanque, consumo, radiação, resistência)

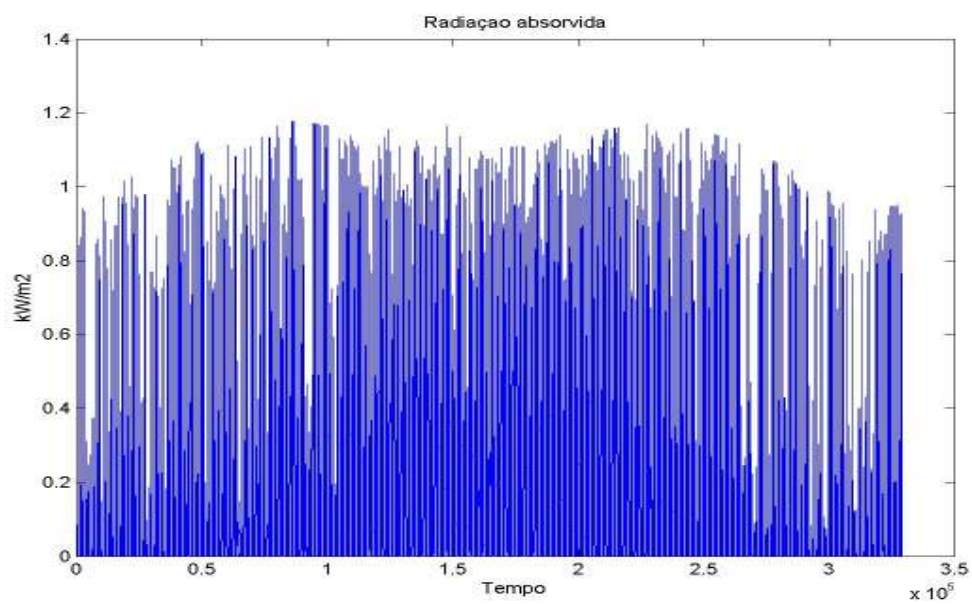


Gráfico 26 Evolução da radiação absorvida num ano

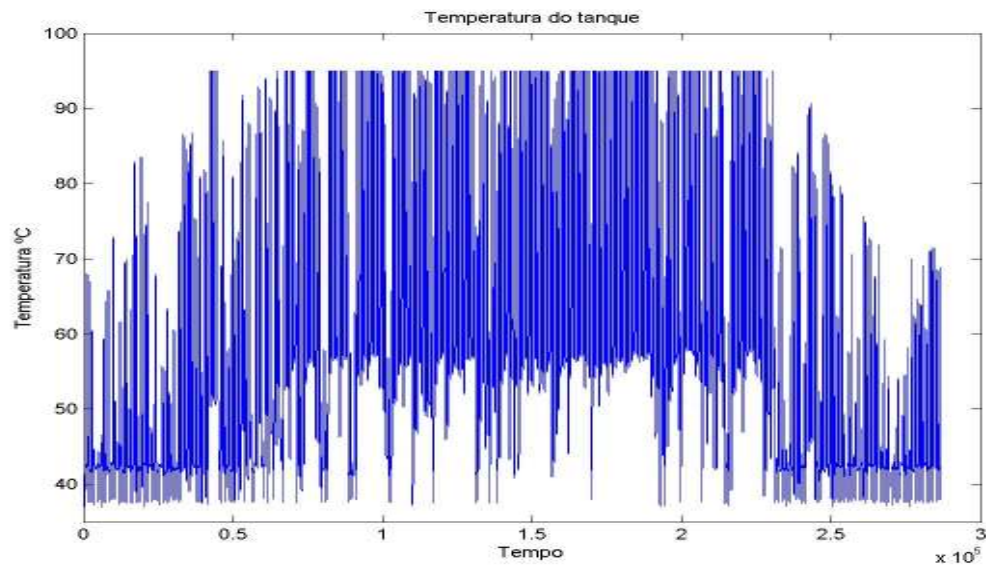


Gráfico 27 Evolução da temperatura do tanque ao longo de um ano

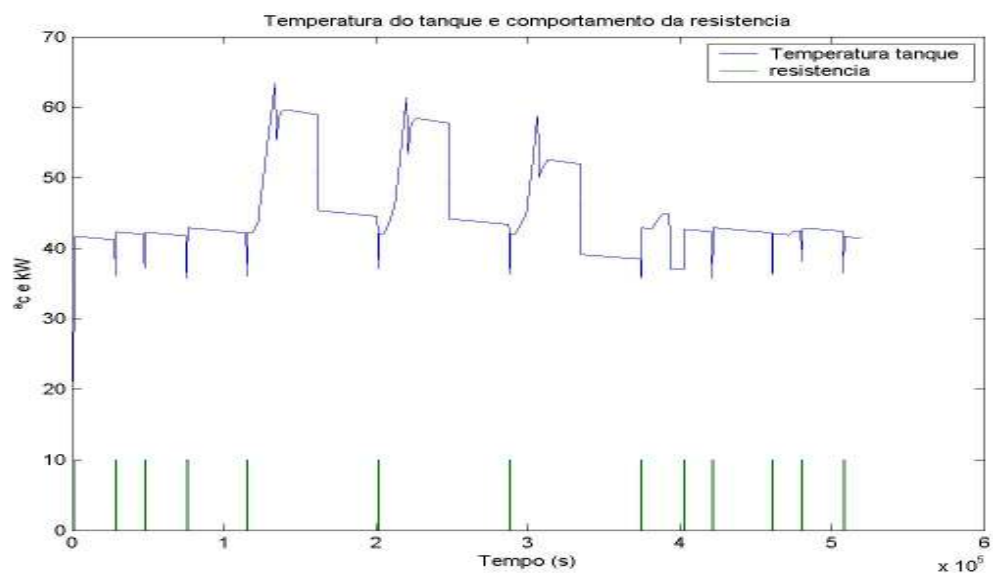


Gráfico 28 Evolução da temperatura e comportamento da resistência do tanque em 6 dias

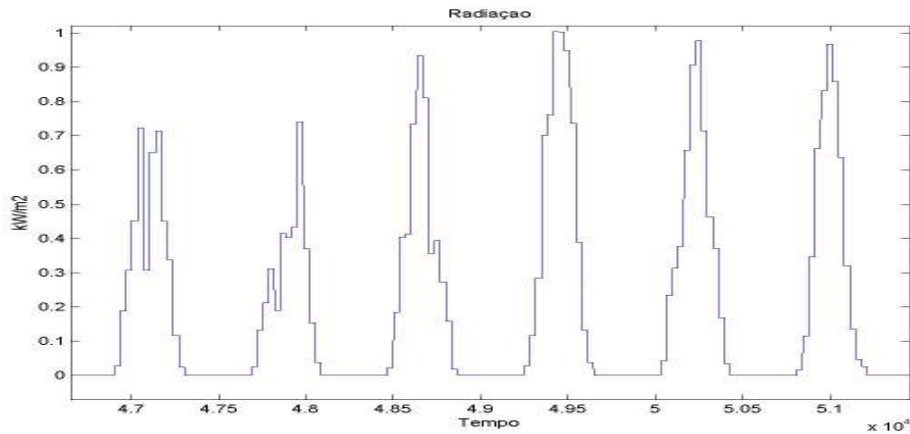


Gráfico 29 Evolução da radiação em 6 dias

É perceptível o aumento gradual da temperatura do tanque na Primavera e Verão, seguindo o comportamento da radiação. Também é notório o funcionamento mais frequente da resistência nos períodos de baixa temperatura, com um comportamento quase neutro no Verão. O consumo foi introduzido da mesma maneira que no Solterm, ou seja, existe um consumo total das 20:00 às 21:00, com um caudal de 0.08l/s que perfaz um total de 288L. Este maior valor obtido no Transol deve-se aparentemente aos factores que não podem ser definidos no Retscreen® ou Solterm®, mas que no Transol são seleccionados pelo utilizador. Entre eles salientam-se as perdas do tanque, que entram com valores de espessura, coeficientes convectivos e condutivos e áreas de transferência. A própria natureza, mais realista do Transol, em que existem ligações físicas entre elementos, pode também influenciar o resultado.

5.5 Resumo do capítulo 5

Neste capítulo analisaram-se dois softwares nacionais protagonistas em análises de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, baseados numa abordagem estática onde é possível caracterizar os diversos componentes, mas não é possível indicar a maneira como se relacionam ou criar perfis de utilização variantes no tempo. Foram abordados o Retscreen® e o Solterm®. Este último permite uma análise mais detalhada e precisa. Os testes foram levados a cabo no Retscreen®; posteriormente no Solterm com perfil de consumo semelhante ao Retscreen®; no Retscreen® com dados climáticos do Solterm (valores de hora a hora e portanto mais refinados); no Solterm com a sua própria base de dados e consumo definido pelo utilizador e por fim o Transol com um consumo semelhante ao Retscreen®. Em todas as análises usaram-se dados de entrada semelhantes sempre que possível, como por exemplo, características dos colectores, radiação, temperatura ambiente, entre outros. A análise demonstrou que o valor de energia auxiliar consumida era relativamente semelhante entre os vários testes, sendo

que o Retscreen® acusou um maior gasto, seguido do modelo Transol . O Solterm obteve os menores valores. Os resultados atingidos são resumidos na Tabela 4:

Análise	Consumo auxiliar (kWh)
Retscreen®	1000
Retscreen® com dados climáticos do Solterm®	900
Solterm® com consumo semelhante ao Retscreen®	493
Solterm® com consumo definido pelo utilizador	521
Transol com consumo semelhante ao Retscreen®	708

Tabela 4 Valores de consumo de energia auxiliar nas várias análises

CAPITULO 6: POTENCIAL DE ANÁLISE PERMITIDO PELO MODELO TRANSITÓRIO

6.1 Introdução

Como foi referido anteriormente, é possível alterar os parâmetros de cada componente do sistema com vista a melhorar a performance geral do mesmo. Nas secções seguintes tentar-se-á melhorar o sistema ao alterar esses parâmetros. A primeira abordagem consistirá em analisar cada componente qualitativamente, ou seja, os restantes parâmetros terão uma importância secundária. No fim de testar cada um deles, manter-se-á o melhor valor registado e assim consecutivamente, ou seja, por exemplo, se se concluir que o número óptimo de caudal é de 0.03l/s é esse valor que se usará nos testes que se fizerem a seguir.

6.2 O efeito do volume e número de reservatórios de armazenamento

Pelo que já foi descrito, os tanques com ligação em série contra-corrente, apresentam um melhor desempenho que os outros tipos de ligações. Deste modo, e á semelhança do que acontece com os colectores solares em série, é este tipo de ligação que se usará nos testes subsequentes.

Tanques L (consumo e apoios)	Potencia kWh	Área colectores: 2.06*2=4.12m ² Caudal primário: 0.03kg/s Potencia da resistência auxiliar: 7kW Inclinação: 35° Azimute: 0° Isolamento: 50mm
20 (consumo)	56	
60		
45		
90		
50 (consumo)	60	
150		
20 (consumo)	67	
60		
30		
100		
30 (consumo)	67	
170		
20 (consumo)	82	
40		
50		
70		
20 (consumo)	101	
40		
100		
100		

Tabela 5 Combinações de volumes de 4 tanques para 4.12m^2 (2) de colectores

1 Tanque:

Para perceber qual o efeito de não analisarmos o número de tanques e suas ligações (á semelhança do que acontece nos softwares estacionários), é apresentado o valor de um teste com um só tanque e os mesmos 2 colectores em série, e o valor obtido é de **400kWh** ($k_{\text{isolamento}} = 0.04 [\text{W/m/K}]$) e **568kWh** ($k_{\text{isolamento}} = 1.01 [\text{W/m/K}]$). Este valor é mais baixo do que o apresentado no capítulo 5.4.5, pois agora considerou-se um consumo mais realista e portanto, em vez de se assumir que todo o consumo é efectuado á noite, considera-se que é realizado durante a manha, almoço e noite. Estes valores atestam a importância de se analisar o número de tanques instalados e respectivos volumes.

A Tabela 5 encontra-se organizada em forma crescente de consumo de energia auxiliar num período anual, é fácil perceber que a melhor combinação de volumes é a primeira, com os valores: 20L 60L 45L 90L, no sentido do tanque que serve para consumo para os restantes tanques, sendo o de 90L aquele que recebe a água fria da rede.

Dado que o caso de estudo se baseia num agregado de 4 pessoas, a área recomendada é de 4m^2 . Sendo assim, usar-se-ão sempre 2 colectores com 4.12m^2 totais. Do mesmo modo usa-se a melhor combinação de volumes verificada. O factor testado seguidamente é o caudal do circuito primário que influencia a potência da bomba necessária (como já explicado anteriormente).

6.3 Caudal do circuito primário

Tanques L (consumo e 3 apoios)	Caudal (kg/s)	Potencia kWh
20 60 45 90	0.01	53
	0.02	46
	0.03	58
	0.04	67
	0.05	75

Tabela 6 Variação da energia consumida com o aumento do caudal do circuito primário

Denota-se um comportamento não linear apresentado na Tabela 6, com um decréscimo nos kWh consumidos seguido de um acréscimo, à medida que o caudal aumenta. O valor óptimo encontra-se nos 0.02kg/s. Quanto menor for o valor de caudal que beneficia o sistema, melhor, pois traduz-se numa poupança de energia de bombagem.

6.4 Potência da Resistência auxiliar

Tanques (consumo e 3 apoios) (L)	Caudal (kg/s)	Potência da resistência (kW)	Potência (kWh)
20 60 45 90	0.02	6	48
		8	46
		10	45
		12	47
		14	46

Tabela 7 Variação da energia consumida com o aumento da potência nominal da resistência

Rápido se conclui da Tabela 7 que não existe variação no valor de energia consumida devido à alteração da potência nominal da resistência. Será uma vantagem ter uma resistência com uma maior potencia se desejarmos um rápido aquecimento do

tanque, e uma vez que isso não representa um custo significativo (na energia consumida) será uma boa opção.

6.5 Inclinação do colector

Tanques (consumo e 3 apoios) (L)	Caudal (kg/s)	Potência da resistência (kW)	Inclinação °C	Potência (kWh)
20 60 45 90	0.02	12	10	80
			20	58
			30	49
			40	48
			50	41
			60	46

Tabela 8 Variação da energia consumida com o aumento da inclinação do colector

A inclinação do colector é um factor preponderante na eficácia do sistema. O “combustível” de todo o sistema é o sol, mais propriamente a radiação solar. Como tal, é essencial que a absorção dessa energia seja maximizada. Com uma inclinação de 10°, muito baixa, o sistema favorece o funcionamento nos períodos de Verão, em que o Sol descreve uma trajetória mais alta (ver Capítulo 3.3.1). Por outro lado, é no Verão que existe maior disponibilidade solar, havendo portanto uma redundância na aplicação de ângulos baixos com objectivo de maximizar o funcionamento do sistema. É no Inverno que o sistema encontra mais obstáculos uma vez que a radiação disponível é mais escassa. Requer-se então otimizar o rendimento do processo no Inverno. Ao analisar os valores de inclinação na Tabela 8, testemunhamos esta optimização, já que para uma inclinação relativamente elevada de 50°, existe um melhor aproveitamento de energia, sendo este o responsável pelo melhor valor atingido em todos os testes: **41kWh**. Tal facto deve-se ao melhor aproveitamento de radiação no Inverno. No Gráfico 30 podemos inferir que o melhor aproveitamento de radiação no Inverno supera a menor eficácia no Verão, totalizando uma menor dependência da resistência auxiliar.

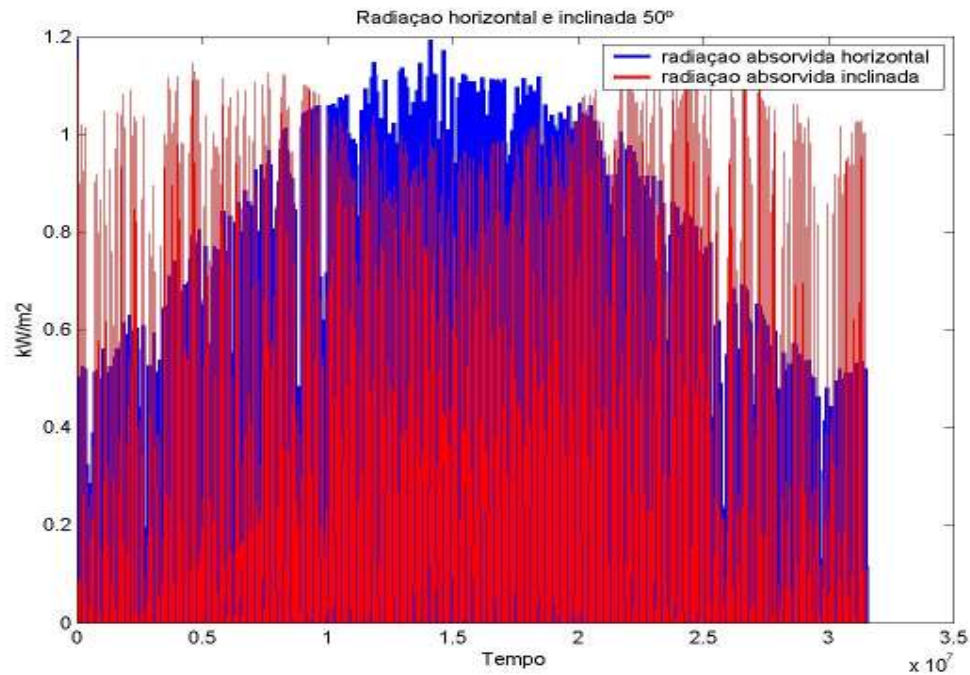


Gráfico 30 Radiação absorvida horizontal e com colector inclinado 50°

6.6 Teste para 16 pessoas

A título de curiosidade, multiplicaram-se todos os factores por 4 (volume dos tanques, número de colectores), de modo a servir 16 pessoas. O resultado não seguiu uma evolução linear e o consumo de energia auxiliar foi de 220kWh. Deste modo se confirma a variabilidade e não linearidade do sistema, o facto de não se averiguar qual o número ideal de colectores e tanques (por exemplo) para este caso de 16 consumidores, deu origem a um resultado superior aquele que seria proporcional. Apresenta-se o gráfico original do Simulink (Figura 61) que diz respeito á temperatura do tanque, consumo, radiação e resistência. O comportamento é, no entanto, semelhante ás restantes análises

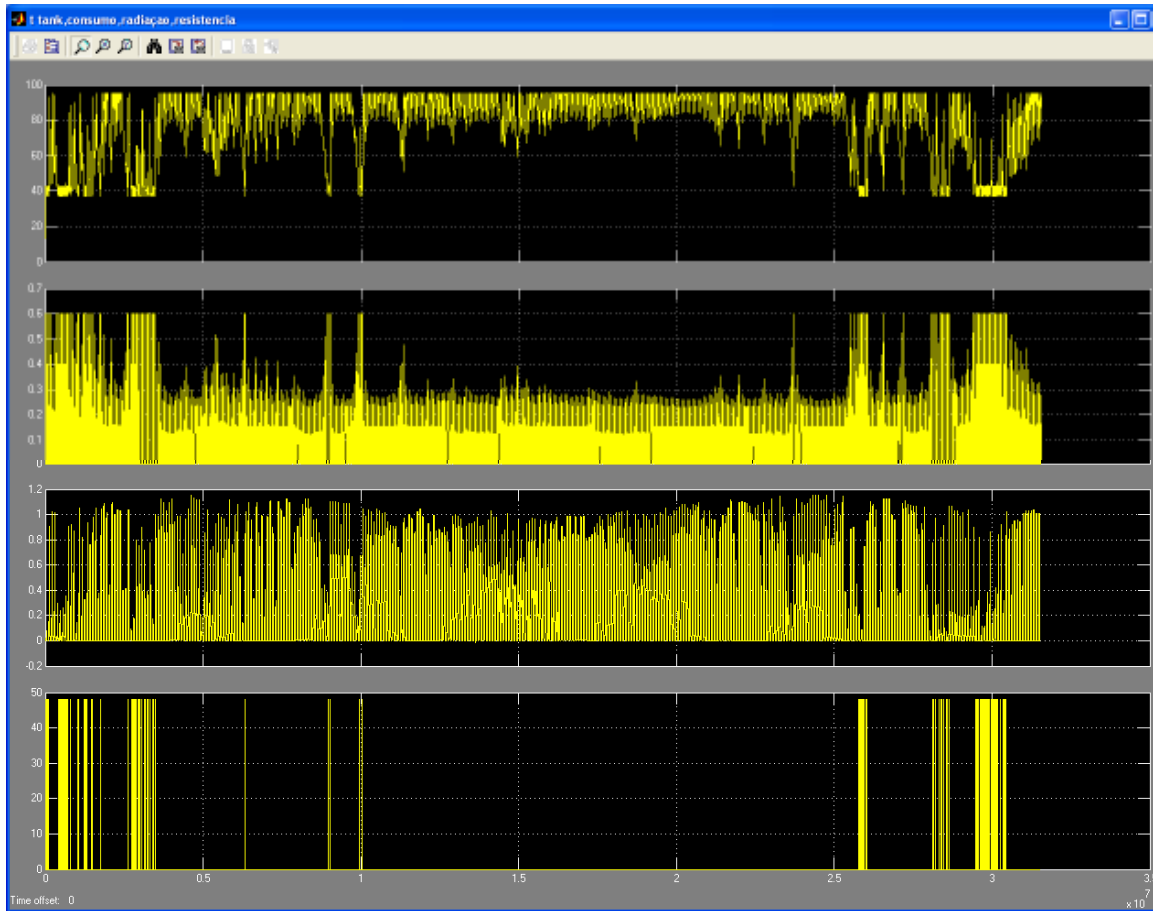


Figura 61 Gráfico do Simulink para um teste com 16 usuários

6.7 Aplicação de colectores mais eficazes

Por fim, e uma vez que se restringiu o aumento de área de captação, será realizado um teste com colectores da Solarco, modelo SC22, com características diferentes dos usados até este ponto. Estes colectores têm uma área de captação de 2m^2 , que continuam a totalizar os pretendidos 4m^2 . Têm um coeficiente de perdas de $3.25 \text{ (W/m}^2 \text{ /K)}$ e um rendimento óptico de 0.79. Pela análise dos valores concluímos que se tratam de colectores com maior capacidade de funcionamento. Mantendo os outros parâmetros constantes o resultado obtido são **28kWh** consumidos. Uma melhoria de 46% sobre os 41kWh obtidos até esta etapa. Embora a melhoria seja comparativamente significativa, em termos absolutos representa uma poupança anual de cerca de 1 euro, que não justifica o maior investimento num colector de rendimento superior. Por último, fazemos a análise com colectores de tubos de vácuo, modelo

ESTEC VR14 CPC, com rendimento de 0.605 e coeficiente de perdas de 0.85 ($\text{W/m}^2/\text{K}$). Como se verifica, este valor é extremamente baixo quando comparados com os outros modelos. O resultado obtido é de **32kWh**. Não é tão baixo como se poderia prever, devido ao baixo valor do rendimento óptico, ainda que o coeficiente de perdas seja elevado. São colectores destinados a climas bastante inóspitos e que não se adequam (sobredimensionam-se) ao nosso solarengo clima.

6.8 Resumo do Capítulo 6

Este capítulo aborda a parte mais dinâmica e objectiva de todo o trabalho. Numa tentativa de promover o abastecimento de água quente a uma família de 4 pessoas, através do uso de um sistema colector solar térmico. O Transol permite estudar a interferência dos vários parâmetros controláveis pelo utilizador e consequentemente promover a sua optimização e controlo. Os testes operados testemunham a mais valia de um sistema de análise dinâmico pois consegue-se influenciar o resultado final através do controlo de várias variáveis. Concluiu-se que 4 pequenos tanques ligados em série contra corrente oferecem melhores resultados que um só tanque. O caudal do circuito primário melhora o sistema para valores de 0.02l/s piorando com o aumento ou diminuição deste. A potência da resistência eléctrica auxiliar usada apenas promove um mais rápido aquecimento do tanque, não interferindo com o valor de energia auxiliar. A inclinação dos colectores tem grande influência no resultado, sendo que um colector inclinado a 50° facilita a absorção de radiação no Inverno, e porque este é um período mais exigente, melhora a eficácia do sistema. Os colectores ligados em série são a melhor opção neste caso, visto que não existe demanda que justifique a adição de mais colectores. Todos os dados de entrada do sistema que são fixos, ou que pelo menos são constantes em cada simulação, são resumidos na Tabela 9:

Área nominal dos colectores (m ²)	2.06
Calor específico do fluido operante (kJ/kg/K)	4.04
Densidade do fluido operante (kg/dm ³)	1.016
Coeficiente de perdas (W/m ² /K)	4.28
Rendimento óptico	0.74
Coeficiente de condutividade k da água (W/m ² /K)	0.58
Coeficiente de condutividade k do ar (W/m ² /K)	0.028
Coeficiente de transferência de calor h (W/m ² /K)	7
Coeficiente de condutividade k do isolamento do tanque (W/m ² /K)	0.04
Rendimento da serpentina (%)	75
Caudal do primário (kg/s)	0.02
Espessura de isolamento (mm)	50
Temperatura da rede (°C)	15
Temperatura de conforto (°C)	40
Margem do funcionamento da resistência (°C)	3

Tabela 9 Valores fixos de entrada do sistema

Como se vê, são várias as opções de alteração que podem ser impostas ao sistema. Desta lista não fazem parte as variáveis que são função do tempo ou aquelas que são objecto de estudo, como o número de colectores e tanques. As que estão presentes são aquelas que menos vezes são alteradas pelo utilizador.

CAPITULO 7: CONCLUSÕES

7.1 Notas finais

O desafio a que este trabalho se propôs foi ultrapassado. A dúvida que existia quanto á viabilidade de construção de um modelo de carácter dinâmico, capaz de simular um sistema colector solar térmico, findou quando surgiram os primeiros resultados que demonstraram o correcto e coerente funcionamento do Transol. A pergunta seguinte prendia-se com as possíveis vantagens da utilização de um sistema deste género. Após alguns testes, verificou-se que os resultados poderiam ser bastante diferentes dependendo das configurações e parâmetros usados. Como esses parâmetros só poderiam ser alterados no Transol, verifica-se então um potencial no uso do mesmo já que podemos expandir e refinar a análise de um determinado caso.

7.2 Principais conclusões

Este trabalho não procura responder a questões relacionadas com um problema tipo. É um estudo generalista e que semeia uma ideia que tem um imenso potencial para crescer e ser desenvolvida a um nível público, em que o modelo Transol deixe de o ser e passe a ser um *software*. Deste modo, os principais aspectos a reter do trabalho são a confirmação daquilo que alguns estudiosos, instaladores ou técnicos já suspeitavam: um sistema solar térmico requer uma análise cuidada fase do projecto pois o modo como se ligam e dimensionam os componentes é fundamental para o bom rendimento do sistema. Questões que se prendem com; número de colectores, quantos colectores em série e em paralelo; quantos tanques e maneira de os ligar, em série, paralelo ou contra corrente; caudal do circuito primário; controlos de temperatura, caudal e geometria do colector; são respondidas ao longo deste trabalho, para um determinado caso de estudo. Podem, no entanto, ser colocadas perante outros cenários e com a mesma filosofia do Transol, podem ser respondidas. Para quantificar o que se afirma, lembremos que se obtiveram valores na ordem das centenas, perto de 500kWh, nos *softwares* de análise semi-estacionária como sendo o Solterm e Retscreen® e mesmo no Transol quando se usavam parâmetros semelhantes. No entanto, com uma simples adição de tanques e outras pequenas alterações, com ligações entre estes em série contra corrente, conseguiram-se resultados na ordem das dezenas, rondando os 50kWh. Poderemos ver que o gasto é 10 vezes menor, o que denota um melhor aproveitamento da energia disponibilizada pelo sistema. Uma poupança de cerca de 500kWh anuais traduz-se grosseiramente em 50€ anuais, sendo este um valor que impõem uma reflexão no momento em que se opta por instalar 4 tanques ao invés de um e todos os custos a isso associados. No entanto, a escala aqui analisada reporta-nos a uma situação pequena e em que as alterações não são perceptíveis na sua total potencialidade. Se olharmos para a análise de um modo percentual, constatamos que o ganho se traduz em cerca de 1000%. Se transpusermos este valor para uma maior escala, por exemplo de um hotel, colocamo-nos perante uma

situação em que os possíveis ganhos anuais são tremendamente significativos, validando os investimentos que de outra forma seriam pouco atractivos.

Uma questão que não foi considerada é a da viabilidade económica. Até que ponto se justifica a adição de mais tanques ou mais colectores, ou mais caudais, etc? Como já foi afirmado, o limite de tempo aliado a uma complexa e não linear análise de custos, impediu que este estudo fosse feito. Levar a cabo uma análise grosseira seria possível, mas além de poder dar origem a erros e a diferentes resultados, não seria produtivo visto que só seria acertado faze-lo para este caso de estudo, que sendo só um, não poderia produzir uma conclusão geral.

7.3 Trabalho Futuro

Como foi referido, devido a questões de cariz temporal, não é possível expandir esta análise de maneira a criar um *software* e não apenas um modelo. A parte mais ingrata foi ultrapassada e sabe-se que o modelo consegue dar resposta às questões colocadas. Sendo o Transol um modelo e sendo limitado no número de utilizadores que o conseguirão utilizar, é de importância capital criar um interface e um automatismo que permita criar as variáveis e controla-las num ambiente *user-friendly* e intuitivo, mantendo o carácter transitório do mesmo. A ser criado, seria um programa que possivelmente poderia complementar os já existentes, e que oferecia aos projectistas um forma simples, barata e real de testar uma instalação sem recorrer a maquetas ou mesmo a componentes de dimensão real. Será primordial a integração de um módulo de análise económico-financeira que dê resposta á viabilidade de investimento e capacidade de retorno do sistema proposto pelo modelo, face ao sistema inicialmente admitido, sendo incluídos nessa análise todas as taxas e índices inerentes. Benéfico seria também a inserção de um módulo dedicado á optimização. Para que exista um potencial de incorporação no mercado, uma base de dados de construtores, nomeadamente de colectores, bombas, tubagens, válvulas e reservatórios ampararia o uso e a veracidade da análise, além de poder ser gerido um sistema publicitário que possibilitava lucros e ajudas de custo ao criador. Á semelhança dos *softwares* aqui apresentados (Retscreen® e Solterm®) era uma mais valia a existência de uma base de dados de informação climática relevante e periodicamente actualizável, face á instabilidade climática a que se assiste.

REFERÊNCIAS

- [1] – “Contributos da Nova Regulamentação para a Eficiência Energética em Edifícios”, Aline Delgado QUERCUS
- [2] – RCCTE, Decreto-Lei n.º 80/2006 de 04-04-2006
- [3] – “Building Integrated Solar Thermal Roofing Systems History, current status and future promise”, John Archibald
- [4] – “Aquecimento Central e AQS e Energia de Apoio (Esquema Básico)”, Energie
- [5] – “Aquecimento de águas quentes sanitárias (AQS) com colectores solares térmicos”, Ensies, M. Paulo Cardeano Ribeiro
- [6] - Solar Kent, <http://www.solarkent.co.uk/>
- [7] – “Sistema Solar Térmico para Edifícios Habitação Colectiva”, Vulcano
- [8] – *Software* Retscreen, <http://www.retscreen.net/ang/home.php>
- [9] – *Software* Solterm, INETI – Departamento de Energias Renováveis
- [10] – Manual TRANSYS, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/trnsys16-new-features-2004-06.pdf>
- [11] – *Software* Matlab, <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- [12] - PCM Lane, G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I. 1983, Florida: CRC Press, Inc.
- [13] – *Software* Fortran, <http://www.fortran.com/>
- [14] – “Transient analysis of a liquid solar collector”, T. Gyanaprakash, R. Varadharaju, Yap Chee Kian, Z.A. Zainal, G.A. Quadir, Zahid Akhtar Khan, P.A. Aswathanarayana, K.N. Seetharamu,
- [15] – Vector Mech Dynam Mathcad 7.0 (PKG), Edition: 6th, Authors(s): Beer, ISBN10: 0075617218, ISBN13: 9780075617211, Pub. Date: 1/1/1998, Publisher(s): MCG
- [16] – *Software* Energy plus <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

- [17] – “Computer modeling and experimental validation of a building-integrated photovoltaic and water heating system”, T.T. Chow, W. He, A.L.S. Chan, K.F. Fong, Z. Lin a, J. Ji
- [18] – “Simulation Model for Solar Water Heating for Food Processing”, Dorota Wójcicka-Migasiuk, Andrzej Chochowski
- [19] – “Simulation of a solar domestic water heating system using a time marching model”, M. Bojic, S. Kalogirou, K. Petronijevic
- [20] – “Potential application of a centralized solar water-heating system for a high-rise residential building in Hong Kong”, T.T. Chow*, K.F. Fong, A.L.S. Chan, Z. Lin
- [21] – “Computer simulation of a two phase thermosyphon solar domestic hot water heating system”, Khalid A. Joudi , Aouf A. Al-tabbakh
- [22] - .“Solar thermal engineering”, Lunde PJ New York: Wiley, 1980.
- [23] – “Convective boiling and condensation”. Collier JG London: McGraw±Hill, 1972.
- [24] – “Thermosyphon Solar Water Heaters: Effect of Storage Tank Volume and Configuration on Efficiency”, Afif Asan
- [25] – “Modeling of an integrated solar system”, Marwa M. Hassana, Yvan Beliveaub
- [26] - Edifício SOLAR XXI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Helder Gonçalves, Susana Camelo, Cristina Horta, Mariz Graça (estudos de modelação), António Joyce e Carlos Rodrigues (sistema fotovoltaico), Álvaro Ramalho, Rocha e Silva (experimentação), Lisboa, Dezembro de 2005
- [27] – *Software* ABAQUS <http://www.simulia.com/>
- [28] – *Software* C++ <http://www.cplusplus.com/>
- [29] – Tutorial Simulink
<http://www.me.cmu.edu/ctms/modeling/thermal/simulinkmodeling/mainframes.htm>

- [30] - Exemplo do Simulink, Site online MathWorks®
http://www.mathworks.com/products/simulink/demos.html?file=/products/demos/shipping/simulink/sldemo_househeat_script.html
- [31] – “Ineficácias técnicas nos sistemas solares térmicos Industriais”, António Baptista, 16-Fev-2006
- [32] – Bright Solar, informações cedidas por e-mail por Carlos Jesus, <http://www.bright-solar.pt>
- [33] – “Forced circulation solar water heater performance prediction by TRNSYS and ANN”, W.WONGSUWAN and S. KUMAR
- [34] – “Matlab® Neural Network Tool“, University Van Amsterdam

http://www.eecs.umich.edu/~someshs/nn/matlab_nn_starter.htm
- [35] – “Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv–thermal solar system on Cyprus”, Soteris A. Kalogirou
- [36] – Manual “Curso de Instaladores Solares Térmicos”, INETI, Eduardo Perez Lebeña, Jorge Cruz Costa, INETI, Lisboa, Julho 2007
- [37] - Manual do Retscreen, “SOLAR WATER HEATING PROJECT ANALYSIS”
- [38] –University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory – Solar data
<http://solardat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html>, 10/05/08

ANEXO – MANUAL DE UTILIZAÇÃO

Embora não seja objectivo primário deste trabalho construir um *software* generalista que permita a qualquer utilizador construir o seu caso de estudo e analisa-lo, apresenta-se neste anexo, um exemplo de como deve ser carregado o modelo para o caso de estudo abrangido neste documento. Tal caso caracteriza-se por um universo de 4 utilizadores de água quente sanitária com um consumo de água de manhã, tarde, e noite. Consumo esse que totaliza 240L de água a uma temperatura conforto de 40°C. Os dados climáticos são retirados da base de dados do Solterm para a localização de Coimbra. São usados 2 colectores ligados em série, com 2,06 m² cada um. Também compõem o sistema 4 tanques com 20, 60, 45 e 90L ligados em série contra corrente. O caudal do circuito primário é de 0.02l/s e a resistência auxiliar tem uma potência de 12kW.

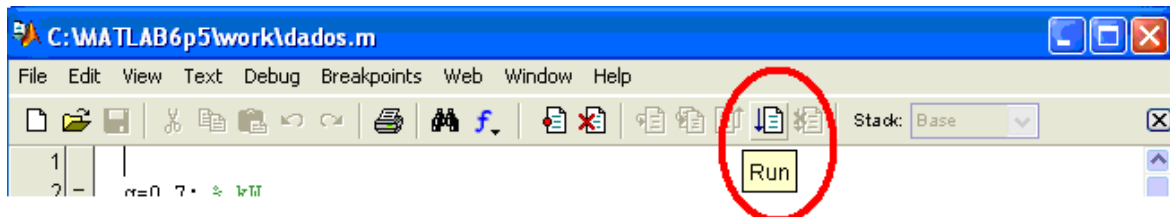
Estando definidos os parâmetros é necessário recorrer ao Matlab® para carregar os vários ficheiros que contêm alguns dos dados referidos.

No Matlab importam-se os ficheiros:

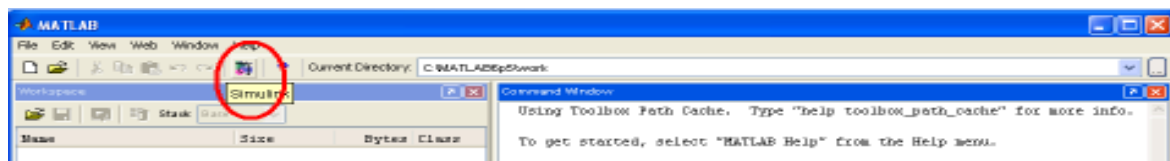
– declination, hour_angle, Coimbra.dat, consumo dez min

No Matlab abrem-se os m-files:

- dados, declination, hour_angle, radiacao, radiacao_dif, consumo_dez_min.
- correm-se os ficheiros carregando no botão assinalado.



Abre-se o Simulink



No Simulink carregam-se os modelos pré-construídos. Existem várias pastas criadas ao longo deste trabalho. Tendo sido um processo sequencial existem pastas que testemunham este processo. Os componentes foram construídos individualmente e ao longo do tempo foram também criados controlos e soluções sempre que surgiu um obstáculo. No entanto, acabaram por ser edificados 6 modelos completos na pasta denominada “pasta 2 c perdas tank” dentro da pasta “Sistema OK”“work”. Estes modelos dizem respeito a:

- análise com consumo total á noite semelhante ao Retscreen® com 2 colectores e 1 tanque.
- análise com consumo normal com 2 colectores e 1 tanque.
- análise com 2 colectores e 4 tanques em série contra corrente

- análise com 2 colectores e 4 tanques em paralelo
- análise para um consumo de 16 pessoas com 8 colectores e 4 tanques
- análise com 2 colectores e 2 tanques em série contra corrente

Sublinha-se a importância do utilizador conhecer a base energética que rege o sistema para poder alterar os parâmetros que achar necessários para adaptar o sistema a casos diferentes. Estes modelos já estão construídos, mas é possível ao usuário criar um novo cenário. Para isso terá de saber e perceber o que significam as entradas e saídas dos vários componentes. Os constituintes individuais estão na pasta homónima. No entanto, a pasta “Sistema OK” contem varias construções abrangendo vários tipos de ligações e portanto bastara ao usuário copiar o bloco que deseja ou a configuração que deseja para o novo sistema. Todos os controlos que foram falados no Capítulo 4, estão igualmente presentes nesses modelos e a sua utilização pode também ser levada a cabo copiando esses controlos para a nova janela.

Após estar o sistema pré-construído (ou outro qualquer) presente no Simulink procede-se á simulação carregando no “Play”. Dependendo da máquina onde decorre a simulação, esta pode levar entre 15 a 30 minutos. Concluído este passo é necessário ir novamente ao ambiente Matlab® e abrir o ficheiro que diz kWh. Quando esta variável estiver carregada no ambiente (aparecerá um aviso que assim o confirma), escreve-se por fim “kW(kWh(2,:),0)”. Aparecerá na janela o valor dos kWh gastos no processo.